

# **Simulação computacional do escoamento em torno de um capacete de ciclista usado nas provas de contra-relógio**

*Eleutério Baptista Caboz*

**Dissertação do MIEM**

Orientador: Prof. José Manuel Laginha Mestre da Palma



**Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto**

**Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica**

Julho de 2010

## RESUMO

A simulação computacional do escoamento em torno do capacete de ciclismo usado nas provas de contra-relógio é de grande importância, porque permite compreender os fenômenos ocorridos e assim obter uma informação detalhada do campo de escoamentos e as causas da resistência aerodinâmica. O objectivo deste tipo de estudos é melhorar o desempenho desportivo do atleta/ciclista através de posições na bicicleta ou capacetes com menor resistência aerodinâmica.

A simulação do capacete teve como base a posição de contra-relógio na qual se variou a posição do capacete em relação à zona cervical para 3 posições diferentes: 0°, 30° e 60°. Para o efeito foram criadas várias formas de capacetes com o intuito de compreender a influência da forma no coeficiente de resistência aerodinâmica e foi definido o domínio de integração e as condições de fronteira para o caso em estudo.

Os resultados no ANSYS FLUENT mostraram que a forma, a inclinação e a área frontal do capacete têm uma grande influência na aerodinâmica. Ao aumentar a inclinação, a área frontal projectada aumentava o que originou uma maior resistência aerodinâmica. A principal fonte de resistência aerodinâmica foi devido à forma do capacete que origina uma diferença de pressão entre as faces anterior e posterior do capacete. A contribuição devido ao atrito viscoso na superfície é de pouca relevância.

Os capacetes de menores dimensões obtiveram um melhor desempenho para a posição 3 (60°), mas nas outras posições verificou-se que não favorecia a aerodinâmica, pois obteve-se maiores valores de coeficiente de resistência aerodinâmica. Por sua vez, os capacetes que tinham uma cauda maior, apresentaram valores de coeficiente de resistência aerodinâmica menores para a posição 1 (0°). O capacete mais aerodinâmico foi otimizado através de três modelos diferentes e obteve-se menores valores de coeficiente de resistência aerodinâmica, devido à diminuição da área frontal e à forma utilizada, sendo que um modelo obteve valores mais baixos de resistência aerodinâmica.

Através de uma análise quantitativa da redução da resistência aerodinâmica e da energia poupada, a utilização de um capacete aerodinâmico permite uma redução da resistência do ar e com isso o ciclista poupa alguma energia. Esta análise teve como comparação os capacetes aerodinâmicos em relação a um capacete normal com e sem aberturas de ventilação. Também calculou-se o tempo poupado para um ciclista que mantém a posição ideal (com um capacete mais aerodinâmico) em relação a outro ciclista que varia a posição (e apresenta um capacete menos aerodinâmico) variando o parâmetro de Cd e verificou-se que algum tempo pode ser poupado (neste estudo foi cerca de 116 segundos).

As aberturas de ventilação incluídas na frente do capacete aerodinâmico não influenciaram significativamente o valor de coeficiente de resistência aerodinâmica. O mesmo não acontece para o capacete normal porque a existência de um número significativo de aberturas provocou um aumento do coeficiente de resistência aerodinâmica.

## ABSTRACT

The computational simulation of flow around the helmet cycling used in time trial stages is of great importance because it allows understanding the phenomena occurring and thereby obtain detailed information of flow field and causes of aerodynamic drag. The aim of such studies is to improve sports performance athlete/cyclist through positions on the bike or helmet with less aerodynamic drag.

The simulation of the helmet was based on the time trial position and varied the position of the helmet relative to the cervical area for three different positions:  $0^\circ$ ,  $30^\circ$  and  $60^\circ$ . For this purpose various forms of helmets have been created in order to understand the influence of shape on the coefficient of drag and it was defined the computational domain and boundary conditions for the case study.

The results in ANSYS FLUENT show that the shape, the inclination and the frontal area of the helmet has a large influence on the aerodynamics. By increasing the inclination, the projected frontal area would lead to greater air resistance. The main source of drag was due to the form drag that causes a difference in pressure between the front and back of the helmet. The contribution due to viscous friction at the surface is no relevance.

The smaller helmets had a better performance for the third position ( $60^\circ$ ), but in the other positions it was found that didn't favor the aerodynamics, since it was obtained for higher values of drag. In turn the helmets with a bigger tail, showed lower values of coefficient of drag for position 1 ( $0^\circ$ ). The helmet most aerodynamic was optimized using three different models and obtained a lower drag coefficient, due to the reduced frontal area and the shape used, and a model obtained lower drag resistance.

Through a quantitative analysis of reducing aerodynamic drag and the energy saved, the use of an aerodynamic helmet allows a reduction of air resistance and thus the rider saves some power. This analysis was to compare the aerodynamic helmets for a normal helmet with and without vents. The time saved for a cyclist was also calculated in which the ideal position was held (and presents a more aerodynamic helmet) in relation to another rider that varies the position (and presents a less aerodynamic helmet), the parameter of coefficient of drag varied and it was found that some time can be saved (in this study was about 116 seconds).

The vents incorporated in front of the helmet did not significantly affect the value of coefficient of drag. The same didn't happen for the normal helmet because the existence of a significant number of vents leading to an increase in the drag coefficient.

## **AGRADECIMENTOS**

Ao Professor José Laginha Palma, meu orientador, expresso o meu agradecimento pelo interesse com que orientou e acompanhou o desenvolvimento do trabalho, pelas sugestões que apresentou, pelo apoio na organização e redacção do texto.

Aos meus colegas de dissertação, Ricardo Pontes, Afonso Rosado, André Pestana e Rui Alves, o meu agradecimento pelas sugestões e conhecimentos prestados e desejar os maiores sucessos nas suas carreiras profissionais.

## CONTEÚDO

1. INTRODUÇÃO .....	1
1.1 HISTÓRIA: O SURGIMENTO E A EVOLUÇÃO DOS CAPACETES .....	2
1.2 COMPONENTES DE UM CAPACETE DE BICICLETA .....	3
1.3 ESTADO DA ARTE.....	4
1.4 OBJECTIVOS.....	5
1.5 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO .....	5
2. MODELO MATEMÁTICO .....	6
2.1. MODELOS DE TURBULÊNCIA.....	7
2.1.1 STANDARD k- $\epsilon$ .....	7
2.1.2. REALIZABLE k- $\epsilon$ .....	8
2.1.3. SHEAR-STRESS TRANSPORT k- $\omega$ .....	8
2.2. MÉTODO DE SOLUÇÃO .....	9
3. RESISTÊNCIA AERODINÂMICA .....	10
3.1 CONCEITOS .....	10
3.2 RESISTÊNCIA AERODINÂMICA NO CICLISTA .....	12
4. SIMULAÇÃO EM CFD.....	13
4.1 POSIÇÃO DO CAPACETE .....	13
4.2 CAPACETES CRIADOS.....	16
4.3 DOMÍNIO DE INTEGRAÇÃO.....	17
4.4 GERAÇÃO E ESCOLHA DA MALHA.....	19
4.4.1 CONDIÇÕES DE FRONTEIRA DO DOMÍNIO.....	21
4.4.2 CONDIÇÕES IMPOSTAS PARA A SIMULAÇÃO NO FLUENT .....	21
4.4.3 RESULTADOS OBTIDOS E CONCLUSÃO RELATIVO À ESCOLHA DA MALHA .....	22
5. ANÁLISE DOS RESULTADOS .....	23
5.1 CAPACETE NA POSIÇÃO 1 (0°).....	26
5.2 CAPACETE NA POSIÇÃO 2 (30°).....	32
5.3 CAPACETE NA POSIÇÃO 3 (60°).....	34
5.4 CONCLUSÕES EM RELAÇÃO AOS MODELOS DE CAPACETES CRIADOS .....	38
6. ENSAIO COM OUTROS MODELOS DE TURBULÊNCIA E ABORDAGEM DOS MODELOS PARA A CAMADA LIMITE.....	39
7. OPTIMIZAÇÃO DO CAPACETE 11 .....	41
7.1 ANÁLISE DOS RESULTADOS .....	43
7.2 INFLUÊNCIA DE REYNOLDS PARA ESCOAMENTOS TURBULENTOS .....	50

7.3 INFLUÊNCIA DAS ABERTURAS NO CAPACETE 11C .....	51
7.4 REDUÇÃO DA RESISTÊNCIA AERODINÂMICA E POTÊNCIA POUPADA .....	54
7.4.1 COMPARAÇÃO ENTRE UM CAPACETE NORMAL SEM ABERTURAS DE VENTILAÇÃO E OS CAPACETES AERODINÂMICOS .....	54
7.4.2 COMPARAÇÃO ENTRE UM CAPACETE NORMAL SEM E COM ABERTURAS DE VENTILAÇÃO...	55
7.4.3 COMPARAÇÃO ENTRE UM CAPACETE NORMAL COM ABERTURAS DE VENTILAÇÃO E OS CAPACETES AERODINÂMICOS .....	56
8. CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS DE TRABALHO FUTURO .....	58
REFERÊNCIAS .....	61
ANEXO A: CAMPO DE ESCOAMENTO EM TORNO DO CAPACETE 11A .....	63
ANEXO B: CAMPO DE ESCOAMENTO EM TORNO DO CAPACETE 11B.....	69
ANEXO C: CAPACETE NORMAL .....	75
ANEXO D: CAMPO DE ESCOAMENTO EM TORNO DO CAPACETE NORMAL COM ABERTURAS .....	76

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Capacete feito em tiras de couro (esquerda), capacete Snell (centro) e o Bell Biker (direita).	2
Figura 2: Capacete “L’il Shell Bell” (esquerda) e capacete moderno (direita).	3
Figura 3: Forças num objecto bidimensional submerso: (a) força de pressão, (b) força viscosa e (c) força resultante (resistência aerodinâmica (D) e sustentação (L)) (retirado do livro Fundamentos da Mecânica dos Fluidos).	10
Figura 4: Forças de pressão e corte num elemento de área infinitesimal localizado na superfície de um corpo imerso (retirado do livro Fundamentos da Mecânica dos Fluidos).	11
Figura 5: Posição de contra-relógio (retirado da internet).	13
Figura 6: Primeira posição (0° em relação à linha horizontal).	14
Figura 7: Segunda posição (30° em relação à linha horizontal).	15
Figura 8: Terceira posição (60° em relação à linha horizontal).	15
Figura 9: 1° (esquerda), 2° (centro) e 3° capacete (direita).	16
Figura 10: 4° (esquerda), 5° (centro) e 6° capacete (direita).	16
Figura 11: 7° (esquerda), 8° (centro) e 9° capacete (direita).	17
Figura 12: 10° (esquerda) e 11° capacete (direita).	17
Figura 13: Domínio integração criado para a simulação do escoamento.	18
Figura 14: Representação esquemática das dimensões do domínio computacional.	18
Figura 15: Aspecto da malha grossa gerada no domínio considerado (cima) e em torno do capacete 7 (baixo).	19
Figura 16: Aspecto da malha média (cima) e fina (baixo).	20
Figura 17: Regiões criadas para as condições de fronteira do problema em estudo através da opção <i>Named selections</i> .	21
Figura 18: Valores de Cd para cada capacete nas três posições.	26
Figura 19: Contornos de pressão estática no capacete 11.	27
Figura 20: Contornos de coeficiente de pressão no domínio de integração do capacete 11.	28
Figura 21: Contornos de velocidade no domínio de integração do capacete 11.	29
Figura 22: Vectores de velocidade para o capacete 11.	30
Figura 23: Linhas de corrente do escoamento para o 11° capacete (mais aerodinâmico).	30
Figura 24: Vectores de velocidade para o capacete 1.	31
Figura 25: Linhas de corrente do escoamento para o 1° capacete (menos aerodinâmico).	31
Figura 26: Contornos do coeficiente de pressão na superfície do capacete 11.	32
Figura 27: Linhas de corrente do escoamento para o 11° capacete.	33
Figura 28: Linhas de corrente do escoamento para o 6° capacete.	33
Figura 29: Coeficiente de resistência aerodinâmica em função da inclinação do capacete 11.	34
Figura 30: Contornos de coeficiente de pressão para o capacete 10.	35
Figura 31: Vectores de velocidade para o capacete 4.	35
Figura 32: Linhas de corrente do escoamento para o capacete 4.	36
Figura 33: Vectores de velocidade para o capacete 10.	36
Figura 34: Linhas de corrente do escoamento para o capacete 10.	37
Figura 35: Capacete com 36 cm de comprimento total (11A).	42
Figura 36: Capacete com 38 cm de comprimento total (11B).	42
Figura 37: Último capacete simulado com 41 cm de comprimento (11C).	42
Figura 38: Valores de coeficiente de resistência aerodinâmica em função da posição.	44

Figura 39: Influência da posição do capacete na força de resistência aerodinâmica. ....	44
Figura 40: Contornos de coeficiente de pressão para o capacete 11C. ....	45
Figura 41: Linhas de corrente do escoamento em torno do capacete 11C. ....	46
Figura 42: Vista de cima das linhas de corrente do escoamento do capacete 11C.....	46
Figura 43: Contornos de coeficiente de pressão do capacete 11C na posição 2. ....	47
Figura 44: Vectores de velocidade. ....	47
Figura 45: Linhas de corrente do escoamento no capacete 11C. ....	48
Figura 46: Contornos de coeficiente de pressão no capacete 11C para a posição 3.....	49
Figura 47: Linhas de corrente do escoamento colocadas na vertical. ....	49
Figura 48: Linhas de corrente do escoamento na horizontal. ....	50
Figura 49: Coeficiente de resistência aerodinâmica em função de elevados números de Re. ....	51
Figura 50: Capacete 11C com 3 aberturas de ventilação. ....	52
Figura 51: Linhas de corrente do escoamento na vertical. ....	53
Figura 52: Vista de cima das Linhas de corrente do escoamento.....	53
Figura 53: Vista de cima do capacete normal dos vectores de velocidade. ....	57
Figura 55: Contornos de velocidade.....	63
Figura 54: Contornos de coeficiente de pressão.....	63
Figura 56: Linhas de corrente do escoamento da velocidade.....	64
Figura 57: Contornos de coeficiente pressão. ....	64
Figura 58: Contornos de velocidade.....	65
Figura 59: Linhas de escoamento da velocidade (vertical). ....	65
Figura 60: Linhas de corrente do escoamento (horizontal). ....	66
Figura 61: Contornos de coeficiente pressão. ....	66
Figura 62: Contornos de velocidade.....	67
Figura 63: Linhas de corrente do escoamento (colocadas na vertical a montante). ....	67
Figura 64: Linhas de corrente do escoamento (colocadas na horizontal a montante). ....	68
Figura 65: Contornos de coeficiente de pressão.....	69
Figura 66: Contornos de velocidade.....	69
Figura 67: Linhas de corrente do escoamento em torno do capacete.....	70
Figura 68: Contornos de coeficiente de pressão.....	70
Figura 69: Contornos de velocidade.....	71
Figura 70: Linhas de corrente do escoamento.....	71
Figura 71: Linhas de corrente do escoamento.....	72
Figura 72: Contornos de coeficiente de pressão.....	72
Figura 73: Contornos de velocidade.....	73
Figura 74: Linhas de corrente do escoamento.....	73
Figura 75: Linhas de corrente do escoamento para a posição 3. ....	74
Figura 76: Capacete normal sem aberturas de ventilação. ....	75
Figura 77: Capacete normal com aberturas de ventilação.....	75
Figura 78: Contornos de pressão no capacete normal com aberturas de ventilação. ....	76
Figura 79: Linhas de escoamento (vista de cima). ....	76
Figura 80: Linhas de corrente do escoamento (vista traseira). ....	77



## ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1: Contribuição da resistência que actua no ciclista, bicicleta e rolamentos. ....	12
Tabela 2: - Características e qualidade dos vários tipos de malha testados no capacete 7 para a posição 1 (0°). ....	21
Tabela 3: Características dos capacetes e valores obtidos de Cd e D. ....	24
Tabela 4: Comparação dos modelos de turbulência e modelos da camada limite para o 11° capacete na posição 1.....	40
Tabela 5: Valores obtidos Cd e D das optimizações feitas no capacete 11.....	43
Tabela 6: Valores resistência aerodinâmica. ....	55
Tabela 7: Redução da resistência aerodinâmica e potência poupada. ....	55
Tabela 8: Redução da resistência aerodinâmica e potência poupada. ....	55
Tabela 9: Redução da resistência aerodinâmica e potência poupada com o uso de um capacete aerodinâmico. ....	56

## NOMENCLATURA

$\rho$	Massa volúmica
$u_i, u_j$	Componentes da velocidade de escoamento
$\mu$	Viscosidade dinâmica
$p$	Pressão
$k$	Energia cinética de turbulência
$\mu_t$	Viscosidade de turbulência
$G_k$	Geração de $k$
$\epsilon$	Taxa de dissipação de energia cinética de turbulência
$\overline{u_i' u_j'}$	Média temporal de velocidades flutuantes
$\sigma_\epsilon$	Número de Prandtl turbulento para $\epsilon$
$\sigma_k$	Número de Prandtl turbulento para $k$
$S$	Módulo do tensor da taxa de deformação média
$\nu$	Viscosidade cinemática
$S_{ij}$	Tensor da taxa de deformação
$\omega$	Taxa de dissipação específica da energia de turbulência
$\Gamma_k$	Difusividade efectiva de $k$
$\tilde{G}_k$	Geração de $k$ devido ao gradiente médio de velocidades
$Y_k$	Dissipação de $k$ devido à turbulência
$\Gamma_\omega$	Difusividade efectiva de $\omega$
$G_\omega$	Geração de $\omega$
$Y_\omega$	Dissipação de $\omega$ devido à turbulência
$D_\omega$	Termo de difusão transversal
$\alpha^*$	Coefficiente de correcção para baixos números de Re
$F_2$	Função de mistura
$a_1$	Constante do modelo Shear-Stress Transport k- $\omega$
$D$	Força de resistência aerodinâmica
$L$	Força de sustentação
$F_x$	Componente da força em x
$F_y$	Componente da força em y
$dA$	Elemento de área infinitesimal

$\theta$	Ângulo entre a força de pressão e a orientação do escoamento
$\tau_w$	Tensão de corte na superfície
$Cd$	Coeficiente de resistência aerodinâmica
$U$	Velocidade do escoamento
$D_{esfera}$	Diâmetro da esfera
$P$	Perímetro da circunferência
$Re$	Número de Reynolds
$A_p$	Área frontal projectada
$Cp$	Coeficiente de pressão
$p_0$	Pressão de referência
$p_{sup}$	Pressão na superfície
$u_c$	Velocidade média do ciclista
$P$	Potência média de saída de um ciclista profissional

# 1. INTRODUÇÃO

O ciclismo foi testemunha de numerosos avanços tecnológicos ao longo dos anos. Nas últimas décadas, o avanço da tecnologia tem levado os ciclistas a atingir velocidades que pareciam inatingíveis há cem anos atrás. Grande parte deste desenvolvimento, pode ser atribuído aos avanços no campo da aerodinâmica e da importância deste assunto no âmbito do ciclismo.

Os túneis de vento são usados com frequência, porque permitem a realização de teste num ambiente controlado, sendo possível alterar a velocidade e direcção do vento que atinge o ciclista, e têm sido usados na análise de vários equipamentos utilizados no ciclismo com o objectivo de melhorar a aerodinâmica (Gibertini and Grassi, 2008).

Uma técnica alternativa e complementar dos ensaios em túnel de vento é a Mecânica dos fluidos Computacional (Computational Fluid Dynamics), baseada na solução das equações diferenciais não lineares (as equações de Navier-Stokes), que descrevem o escoamento do fluido em torno de uma geometria predefinida. Os resultados obtidos permitem ter uma previsão sobre as velocidades de escoamento, temperaturas, pressões para um dado ponto e compreender os fenómenos ocorridos. Contudo estas previsões, devido às hipóteses simplificativas que lhes estão subjacentes, carecem de validação o que normalmente se realiza por comparação com resultados dos ensaios em túneis de vento.

## 1.1 HISTÓRIA: O SURGIMENTO E A EVOLUÇÃO DOS CAPACETES

Desde os primeiros dias do ciclismo havia lesões, à medida que as estradas começaram a ser pavimentadas, as lesões devido às quedas aumentavam. Em 1880 surgiu o primeiro capacete feito de cortiça, pois era o material disponível na época (referenciado no Bicycle Helmet Safety Institute, The History of Bicycle Helmets por Randy Swart). Em princípios do século XX, os ciclistas começaram a usar capacetes feitos de tiras de couro (Figura 1, esquerda).



**Figura 1:** Capacete feito em tiras de couro (esquerda), capacete Snell (centro) e o Bell Biker (direita).

Mais tarde veio a comprovar-se que estes capacetes não protegiam muito a cabeça. Nos Estados Unidos em 1970, a fundação Snell<sup>1</sup> promulgou o primeiro capacete de bicicleta *standard* (Figura 1, centro), mas que viria a ser ultrapassado pelos leves capacetes de motocicleta.

O primeiro capacete desenhado exclusivamente para bicicleta era o Bell Biker lançado em 1975, que apresentava uma cobertura dura de poliuretano, embora ainda houvesse pouca ventilação (Figura 1, direita).

No início dos anos 80 ocorre o grande passo no desenvolvimento de capacetes de bicicleta, quando a Bell introduziu o seu “L’il Shell Bell”, um capacete para crianças sem revestimento exterior (Figura 2, esquerda). Em 1990 com o aparecimento de uma nova tecnologia de construção, em que um revestimento foi reincorporado durante o processo de moldagem, vindo a tornar-se na tecnologia dominante. Esta tecnologia permite uma maior ventilação da cabeça, através da criação de mais e maiores aberturas no capacete, garantindo também a protecção necessária (Figura 2, direita). Desde então vários modelos de variadas formas têm surgido.

---

<sup>1</sup> A fundação Snell é uma organização sem fins lucrativos, que há mais de 50 anos tem se dedicado à pesquisa, educação, testes e desenvolvimento de normas de segurança para capacetes.



**Figura 2: Capacete “L’il Shell Bell” (esquerda) e capacete moderno (direita).**

O estudo dos equipamentos utilizados no ciclismo teve origem em 1989, quando o americano Greg Lemond utilizou barras de direcção (*handlebars*) e um capacete aerodinâmico para a corrida e venceu a Volta a França na última etapa. Desde então, muita pesquisa foi realizada em quase todos os equipamentos, que vão desde as rodas à camisola, pois todos estão cientes dos benefícios que a aerodinâmica pode trazer ao ciclismo de competição.

## **1.2 COMPONENTES DE UM CAPACETE DE BICICLETA**

Os capacetes de bicicleta actuais têm de obedecer a normas para garantir a protecção da cabeça dos ciclistas, e são submetidos a rigorosos testes de qualidade. De forma resumida, o capacete tem os seguintes componentes:

- Forro – geralmente são feitos de espuma de poliestereno expandido (EPS), polipropileno expandido (EPP) ou poliuretano expandido (EPU), e tem como objectivo absorver a força de impacto através da deformação;
- Revestimento – o revestimento é incluído durante o processo de moldagem, quando a espuma é expandida. O material a utilizar deve ser de elevada qualidade, como por exemplo o policarbonato ou outro plástico de alta qualidade que resista ao calor durante o processo de moldagem. O revestimento de plástico pode ser reforçado com fibras de carbono, kevlar ou fibras de vidro, com o objectivo de aumentar a resistência do capacete;
- Alças – mantêm o capacete fixo na cabeça, são feitas de nylon ou polipropileno.

## 1.3 ESTADO DA ARTE

A pesquisa bibliográfica revelou a existência de alguns artigos relacionados com o estudo de capacetes para bicicleta e também não menos importante o estudo sobre a simulação em CFD de um ciclista. Alguns desses estudos envolviam o estudo da aerodinâmica, fenómenos da transferência de calor entre a cabeça e o capacete (influência das aberturas na ventilação da cabeça, estudo realizado por Brühwiler et al., 2006).

Um artigo realizado para a Fluent NEWS mostra a utilidade da simulação em CFD para obter bons resultados, foi o caso da equipa britânica de ciclismo nos jogos olímpicos de Atenas em 2004 (Hart, 2005), tendo sido simulados 4 modelos de capacetes com objectivo de encontrar o capacete mais aerodinâmico a utilizar nas corridas de pista coberta e chegaram à conclusão que dois dos capacetes tinham vantagens distintas em relação aos outros dois, tendo utilizado apenas um deles.

Os túneis de vento também têm sido utilizados para analisar os escoamentos em torno do ciclista, nomeadamente analisar os vários componentes utilizados, como por exemplo o capacete e as rodas que foi objecto de estudo (Kyle, 1990).

Alguns destes estudos envolvem a determinação da melhor posição a adoptar por parte do ciclista (corpo e posição da cabeça face à direcção do vento) de maneira a diminuir a resistência do ar que actua no ciclista (Defraeye et al., 2010), simulados no CFD e depois validados num túnel de vento, de modo a avaliar a precisão das simulações. No CFD foram utilizados dois modelos de turbulência, o RANS (Reynolds-averaged Navier-Stokes) e o LES (Large-Eddy simulation), na qual o LES mostrou ser mais preciso em comparação com os resultados no túnel de vento, apesar do seu alto custo computacional, o que pode levar a que o RANS seja preferível nalgumas situações.

O artigo “Aerodynamics of time trial bicycle helmets” (Chabroux et al., 2009) mostra o estudo comparativo de vários capacetes de contra-relógio em relação a um capacete normal, ensaiados em túnel de vento com o objectivo de minimizar a resistência aerodinâmica. Os ensaios foram realizados para duas posturas do tronco e três posições da cabeça, uma vez que a optimização da postura e do equipamento a utilizar é um ponto importante no ciclismo (McLean et al., 1994; Martin, 1996).

## **1.4 OBJECTIVOS**

O objectivo desta dissertação é simular através do ANSYS FLUENT, o escoamento em torno de um capacete de ciclista usado nas provas de contra-relógio. O objectivo é simular a realidade, foram escolhidas 3 posições distintas pois o ciclista não mantém a cabeça sempre na mesma posição ao longo da prova. Para a simulação, várias formas de capacetes foram criadas com o objectivo de encontrar a forma com menor resistência aerodinâmica.

Outro objectivo é quantificar o benefício da utilização de um capacete aerodinâmico em relação a um capacete normal.

## **1.5 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO**

A dissertação está organizada em 8 capítulos, sendo feita uma breve descrição de cada capítulo.

No capítulo 1 é feito uma introdução do presente trabalho, de modo a enquadrar o estudo e a sua importância.

No capítulo 2 está apresentado o modelo matemático, as equações e os modelos de turbulência que o ANSYS FLUENT utiliza e que foram utilizados para o estudo.

O capítulo 3 apresenta o conceito da resistência aerodinâmica e a influência desta no ciclista.

No capítulo 4 é feita a simulação em CFD, tendo sido criadas as formas dos capacetes e incluídas no domínio de integração. Foram ensaiadas várias malhas e simuladas no ANSYS FLUENT, com o propósito de escolher a malha mais adequada.

No capítulo 5 estão apresentados os resultados das simulações e a respectiva discussão dos resultados.

No capítulo 6 são ensaiados outros modelos de turbulência no FLUENT e é feito uma abordagem dos tipos de modelos para a camada limite.

No capítulo 7 é feita uma optimização do capacete mais aerodinâmico, obtido no capítulo 5. Foi simulado a influência das aberturas de ventilação e por fim quantificou-se a percentagem de redução de resistência aerodinâmica e potência poupada em relação a um capacete normal com e sem aberturas de ventilação.

Por fim, no capítulo 8 encontra-se as conclusões deste estudo e as perspectivas de trabalho futuro.



## 2. MODELO MATEMÁTICO

As equações que regem os fenômenos de escoamentos de fluidos e a distribuição espacial de velocidade e pressão são as designadas equações de Navier-Stokes. A não linearidade destas equações faz com que as maiores dos problemas sejam difíceis ou impossíveis de resolver. O ANSYS FLUENT tem por base estas equações (apresentadas no trabalho na notação indicial).

- A equação da continuidade (ou conservação da massa):

Na simulação o escoamento do ar em torno do capacete foi considerado como sendo um fluido newtoniano incompressível, podendo simplificar a equação na seguinte forma:

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

As equações de Navier-Stokes são:

- Equação da conservação de movimento (resultado da aplicação da segunda lei de Newton ao movimento do fluido):

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \mu \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] \quad (2)$$

## 2.1. MODELOS DE TURBULÊNCIA

Neste trabalho foram utilizados vários modelos de turbulência, seguidamente será feita uma abordagem resumida das características de cada modelo utilizado, baseado do *User's Guide* do ANSYS FLUENT, pelo que para mais informações sobre os modelos de turbulência consultar o mesmo.

### 2.1.1 STANDARD k- $\epsilon$

Este modelo proposto por Launder e Spalding (1972) é o mais simples de entre os modelos usados. Utiliza duas equações de transporte, em que as duas equações de transporte separadas permitem determinar a velocidade turbulenta e a escala de comprimento de forma independente. O modelo *standard k- $\epsilon$*  é um modelo semi-empírico baseado no modelo das equações de transporte para a energia cinética de turbulência ( $k$ ) e taxa de dissipação ( $\epsilon$ ). O modelo da equação de transporte para  $k$  é derivado a partir da equação exacta. Por sua vez, o modelo da equação de transporte para  $\epsilon$ , é obtido de maneira mais complexa e na qual tem poucas semelhanças que o modelo  $k$ . Este modelo é só válido para escoamento completamente turbulento.

A energia cinética de turbulência  $k$  é obtida:

$$\frac{d}{dt}(\rho k) + \frac{d}{dx_i}(\rho k u_i) = \frac{d}{dx_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k - \rho \epsilon \quad (3)$$

E a taxa de dissipação é obtida através da seguinte equação:

$$\frac{d}{dt}(\rho \epsilon) + \frac{d}{dx_i}(\rho \epsilon u_i) = \frac{d}{dx_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} G_k - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k} \quad (4)$$

O termo  $G_k$  é calculado:

$$G_k = -\rho \overline{u_i' u_j'} \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \quad (5)$$

A viscosidade de turbulência  $\mu_t$  é calculada combinando  $k$  e  $\epsilon$ , na qual resulta a seguinte expressão:

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\epsilon} \quad (6)$$

As constantes  $C_{1\epsilon}$ ,  $C_{2\epsilon}$ ,  $C_\mu$ ,  $\sigma_k$  e  $\sigma_\epsilon$  foram determinados experimentalmente.

$$C_{1\epsilon} = 1,44 ; C_{2\epsilon} = 1,92 ; C_\mu = 0,09 ; \sigma_k = 1,0 ; \sigma_\epsilon = 1,3$$

### 2.1.2. REALIZABLE k- $\epsilon$

O modelo *realizable k- $\epsilon$*  foi desenvolvido recentemente (Shih et al., 1995) e difere do modelo *standard k- $\epsilon$*  relativamente à forma como é tratada a viscosidade de turbulência (em que foi introduzido uma nova formulação) e a equação de transporte para a taxa de dissipação. Este modelo apresenta um melhor desempenho para escoamentos que envolvem rotação, para camadas limites sujeitas a gradientes de pressão adversos, separação e recirculação.

A equação de transporte para energia cinética de turbulência  $k$  é idêntica ao modelo *standard k- $\epsilon$*  (3), o mesmo não acontece com a equação de transporte para a taxa de dissipação  $\epsilon$ , que é diferente do modelo *standard*, sendo esta:

$$\frac{d}{dt}(\rho\epsilon) + \frac{d}{dx_j}(\rho\epsilon u_j) = \frac{d}{dx_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + \rho C_1 S \epsilon - \rho C_2 \frac{\epsilon^2}{k + \sqrt{\nu \epsilon}} \quad (7)$$

Onde

$$C_1 = \max \left[ 0,43; \frac{n}{n+5} \right], \quad n = S \frac{k}{\epsilon}, \quad S = \sqrt{2S_{ij}S_{ij}}$$

A viscosidade de turbulência é igual a equação (6) do modelo *standard*, mas  $C_\mu$  não é uma constante. As constantes do modelo são:

$$C_{1\epsilon} = 1,44 \quad C_2 = 1,9 \quad \sigma_k = 1,0 \quad \sigma_\epsilon = 1,2$$

### 2.1.3. SHEAR-STRESS TRANSPORT k- $\omega$

O modelo *Shear-Stress Transport* (SST) k- $\omega$  foi desenvolvido por Menter (1994). Este modelo não representa em si um novo modelo de turbulência, mas a composição entre os modelos k- $\omega$  e k- $\epsilon$ , assim, esta formulação possui dois conjuntos de equações de transporte. As equações de transporte para k- $\omega$  são utilizadas na região próxima da parede, enquanto as equações de transporte para k- $\epsilon$  são utilizadas na região externa do escoamento. A energia cinética de turbulência  $k$  (8) e para a taxa de dissipação específica  $\omega$  (9) são obtidas a partir das seguintes equações de transporte:

$$\frac{d}{dt}(\rho k) + \frac{d}{dx_i}(\rho k u_i) = \frac{d}{dx_j} \left( \Gamma_k \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right) + \tilde{G}_k - Y_k \quad (8)$$

e

$$\frac{d}{dt}(\rho \omega) + \frac{d}{dx_i}(\rho \omega u_i) = \frac{d}{dx_j} \left( \Gamma_\omega \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right) + G_\omega - Y_\omega + D_\omega \quad (9)$$

A viscosidade de turbulência é calculada neste modelo como:

$$\mu_t = \frac{\rho k}{\omega} \frac{1}{\max \left[ \frac{1}{\alpha^*}, \frac{SF_2}{\alpha_1 \omega} \right]} \quad (10)$$

## 2.2. MÉTODO DE SOLUÇÃO

O ANSYS FLUENT apresenta dois métodos de solução, o *pressure – based* e o *density – based*. Ambas as soluções podem ser usadas para uma ampla gama de escoamentos, embora em alguns casos uma solução pode ter melhor desempenho do que outra. A solução baseada na pressão é utilizada para escoamentos incompressíveis e pouco compressíveis. A solução que foi utilizada na simulação foi a baseada na pressão (*pressure-based*), pois a velocidade do ar sobre o capacete não é muito elevada, podendo considerar o escoamento incompressível.

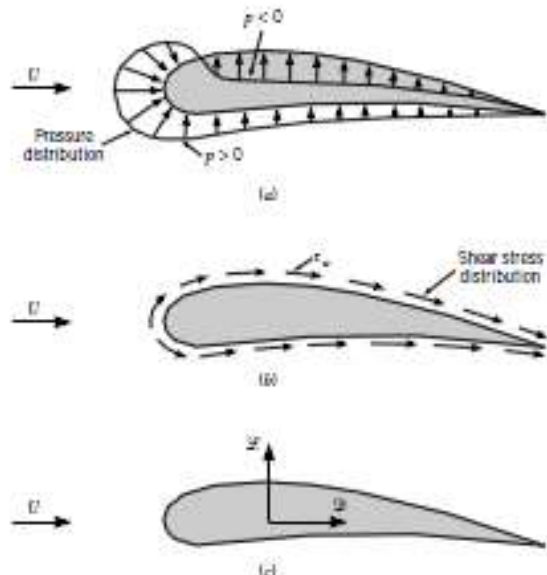
Na solução baseada na pressão, existe dois algoritmos, o algoritmo segregado (SIMPLE) em que as equações governantes são resolvidas sequencialmente (separadas uma da outra) e o algoritmo acoplado (Coupled), em que as equações do momento e a equação da continuidade são resolvidas de uma forma conjugada. A diferença destes dois algoritmos reside na velocidade de convergência e no requisito de memória (o algoritmo acoplado melhora significativamente a velocidade de convergência embora necessite de mais memória do que o algoritmo segregado). O algoritmo utilizado na simulação foi o segregado.

O método de solução baseado na pressão, o campo de velocidades é obtido a partir das equações de movimento. O campo de pressões é calculado através de uma equação de pressão ou correcção da pressão que é obtida através da manipulação das equações da continuidade e do movimento.

### 3. RESISTÊNCIA AERODINÂMICA

#### 3.1 CONCEITOS

A resistência aerodinâmica é a força que se opõe ao movimento de um corpo sólido através de um fluido (líquido ou gás) e actua na direcção oposta ao movimento. Quando um corpo se move através de um fluido, há uma interacção entre o corpo e o fluido, descrita por forças que actuam na superfície do corpo. Estas forças são escritas em função da tensão de corte na parede, devido aos efeitos viscosos, e da tensão normal que é provocada pela pressão (Figura 3). A resistência aerodinâmica pode ser obtida pela integração das tensões de corte e normais ao corpo.



**Figura 3:** Forças num objecto bidimensional submerso: (a) força de pressão, (b) força viscosa e (c) força resultante (resistência aerodinâmica (D) e sustentação (L)) (retirado do livro Fundamentos da Mecânica dos Fluidos).

A componente da força resultante que actua na direcção do escoamento é designada por força de resistência aerodinâmica (D) (como dito no início do capítulo), e a que actua na direcção perpendicular ao escoamento é designada por sustentação (L). A sustentação não será tratada no estudo, pois a sustentação gerada no capacete é muito baixa e também não é um factor importante para o estudo. A resistência aerodinâmica (e a sustentação) pode ser obtida pela integração das tensões de corte e normais ao corpo. Considerando um pequeno elemento de área  $dA$ , as componentes x e y da força são:

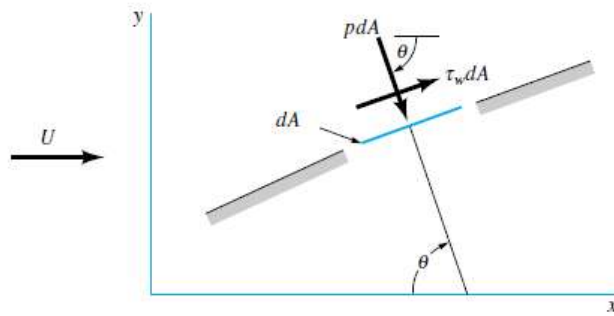
$$dF_x = (pdA)\cos\theta + (\tau_w dA)\sin\theta \quad (11)$$

$$dF_y = -(pdA)\sin\theta + (\tau_w dA)\cos\theta \quad (12)$$

Em que os módulos das forças D e L actuates são:

$$D = \int dF_x = \int p \cos\theta \, dA + \int \tau_w \sin\theta \, dA \quad (13)$$

$$L = \int dF_y = - \int p \sin\theta \, dA + \int \tau_w \cos\theta \, dA \quad (14)$$



**Figura 4: Forças de pressão e corte num elemento de área infinitesimal localizado na superfície de um corpo imerso (retirado do livro Fundamentos da Mecânica dos Fluidos).**

As equações anteriores são difíceis de aplicar pois são desconhecidos as distribuições de pressão e tensão de corte ao longo de uma superfície, sendo utilizadas apenas para situações simples. De modo a ultrapassar este obstáculo foram definidos coeficientes adimensionais de resistência aerodinâmica e de sustentação que permite obter valores aproximados a partir de uma análise mais simplificada. O coeficiente de resistência aerodinâmica é definido pela expressão seguinte:

$$Cd = \frac{D}{\frac{1}{2}\rho U^2 A_p} \quad (15)$$

Em que a  $A_p$  é a área frontal do objecto imerso, isto é, a área projectada na direcção perpendicular ao escoamento, vista por um observador que olha de frente na direcção paralela à velocidade do escoamento,  $U$ . O ANSYS FLUENT calcula o parâmetro adimensional  $C_d$  e com isso é possível determinar a força de resistência aerodinâmica que actua no corpo.

### 3.2 RESISTÊNCIA AERODINÂMICA NO CICLISTA

O desempenho dos ciclistas é afectado pela resistência aerodinâmica a que estão sujeitos (além da resistência dos rolamentos nas rodas e resistência das rodas no pavimento). A uma velocidade de cerca 50 km/h a resistência aerodinâmica contabilizando o ciclista e a bicicleta é cerca de 80-90% (Grappe et al., 1997; Kyle and Burke, 1984). A maior parte da resistência aerodinâmica é causada pelo corpo do ciclista, cerca de 60-70% como é possível ver na Tabela 1 (Gross et al., 1997; Kyle and Burke, 1984).

**Tabela 1: Contribuição da resistência que actua no ciclista, bicicleta e rolamentos.**

	Resistência (%)
<b>Ciclista</b>	60-70
<b>Ciclista+Bicicleta</b>	90
<b>Rolamentos, rodas no pavimento e outros</b>	10

A resistência aerodinâmica originada no ciclista é devido à resistência aerodinâmica viscosa que é causado pelo atrito na superfície da camada limite do ciclista, podendo este ser reduzido através do uso de roupas lisas (com menor rugosidade) ou depilar a pele. A resistência aerodinâmica originada também pode ser devido à pressão (devido à forma do ciclista, considerada complexa), na qual gera-se diferenças de pressões na frente e atrás do ciclista, sendo o principal contribuinte para a resistência aerodinâmica. A resistência aerodinâmica devido à pressão pode ser reduzida através da utilização de equipamentos de modo a reduzir a esteira a jusante do ciclista (como por exemplo através o uso capacetes aerodinâmicos), e optimizando a postura do ciclista na bicicleta, de maneira a diminuir a área frontal.

## 4. SIMULAÇÃO EM CFD

### 4.1 POSIÇÃO DO CAPACETE

A simulação do capacete de ciclismo usado nas provas de contra-relógio, tem como base a posição ideal, a chamada posição aerodinâmica de contra-relógio (*time trial position*) que os ciclistas adotem quando correm neste tipo de provas (Figura 5). Esta posição reduz a resistência do ar porque a área frontal do ciclista é menor, reduzindo assim o esforço do mesmo, sendo que a posição do capacete em relação à velocidade do vento é um ponto crucial para a obtenção de bons resultados.



Figura 5: Posição de contra-relógio (retirado da internet).



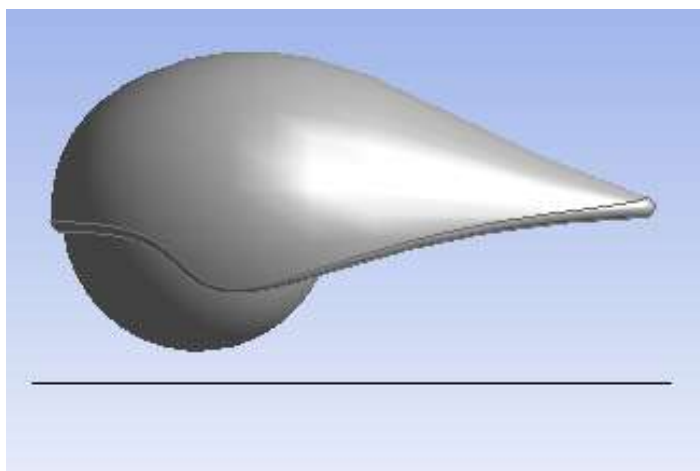
Com base na posição referida, foram testadas várias posições do capacete de maneira a simular a realidade, para isso foram criadas várias geometrias de capacetes diferentes de modo a compreender a influência de cada uma a nível aerodinâmico.

A primeira posição é a considerada posição ideal da cabeça/capacete, em que a cauda do capacete fica colocado próximo da zona cervical do ciclista, pois esta posição permite reduzir a força de resistência aerodinâmica.

A segunda posição é quando o ciclista baixa um pouco a cabeça devido ao cansaço ou outros factores, ficando a cauda um pouco mais afastada da zona cervical.

Finalmente a terceira posição, posição da cauda do capacete encontra-se apontada para cima, pois o ciclista encontra-se com a cabeça baixa. Com esta posição pretende-se simular quando o ciclista se encontra numa subida, tendo este a tendência de baixar quase completamente a cabeça, devido ao esforço ser maior.

De forma a perceber melhor a variação destas posições, considerou-se a zona cervical do ciclista como estando praticamente na horizontal (representado nas figuras seguintes como sendo um linha de referência na horizontal) e com isso variou-se o ângulo em relação à cauda do capacete. Os ângulos experimentados da inclinação do capacete em relação à zona cervical foram  $0^\circ$ ,  $30^\circ$  e  $60^\circ$ , correspondentes à 1ª, 2ª e 3ª posição respectivamente, como é possível ver nas figuras seguintes.



**Figura 6: Primeira posição ( $0^\circ$  em relação à linha horizontal).**

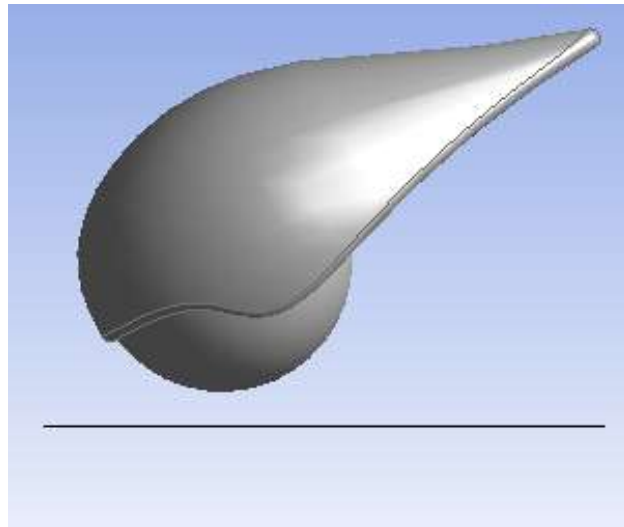


Figura 7: Segunda posição (30° em relação à linha horizontal).

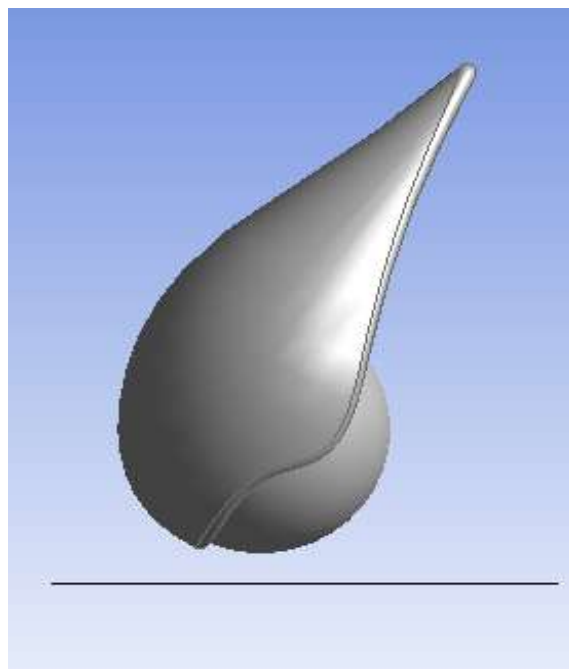


Figura 8: Terceira posição (60° em relação à linha horizontal).

## 4.2 CAPACETES CRIADOS

Os capacetes de contra-relógio criados têm como objectivo compreender a influência da forma da geometria na resistência aerodinâmica. A forma da geometria é um dos factores que influencia a resistência aerodinâmica, por isso foram ensaiados várias formas de capacetes, dando mais atenção à parte da cauda do capacete, pois é nesta região que pretende-se reduzir a turbulência e desta maneira melhorar a aerodinâmica.

Foi considerada no lugar da cabeça uma esfera de circunferência 58 cm (perímetro de uma cabeça de tamanho médio), calculou-se o diâmetro da esfera:

$$D_{esfera} = \frac{P}{\pi} = \frac{58}{\pi} \approx 18,5 \text{ cm}$$

Foram criadas onze formas de capacetes de contra-relógio no ANSYS *Workbench*, em que fez-se variar o comprimento total do capacete entre os 28 cm e os 41 cm (cerca de 19 cm correspondem ao comprimento da cabeça). A maior parte dos capacetes apresenta um perfil arredondado na parte da frente da cabeça, excepto um (capacete 11) em que foi colocado na parte da frente um perfil pontiagudo. Também foi ensaiado alguns capacetes em que a cauda era curta (como por exemplo o capacete 2, 6 e 10). Nas figuras seguintes encontra-se as geometrias criadas.

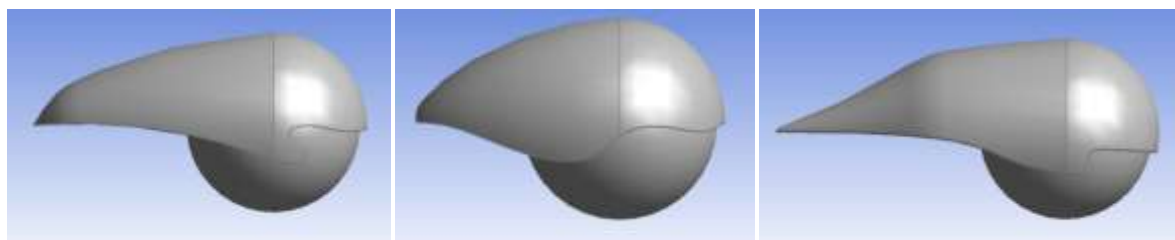


Figura 9: 1º (esquerda), 2º (centro) e 3º capacete (direita).

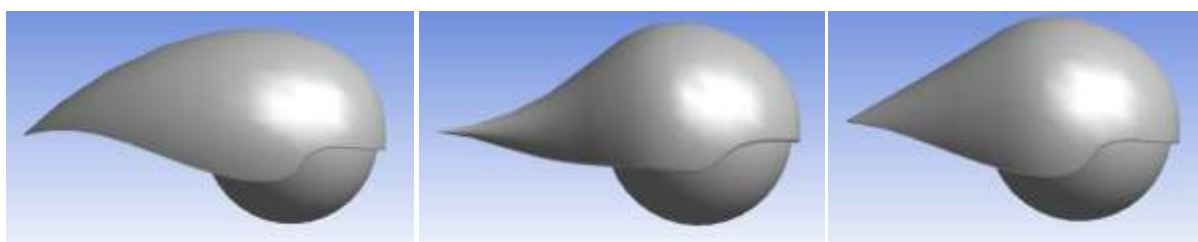


Figura 10: 4º (esquerda), 5º (centro) e 6º capacete (direita).

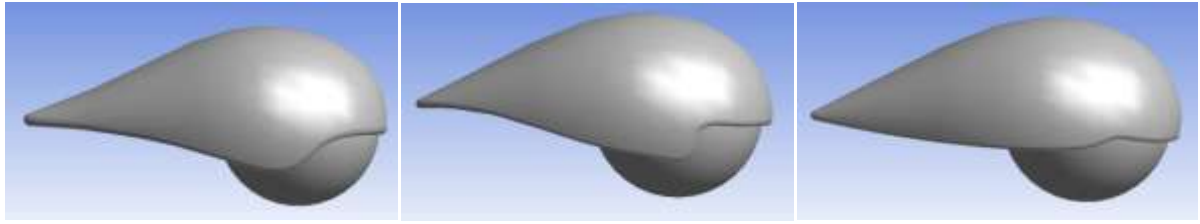


Figura 11: 7° (esquerda), 8° (centro) e 9° capacete (direita).

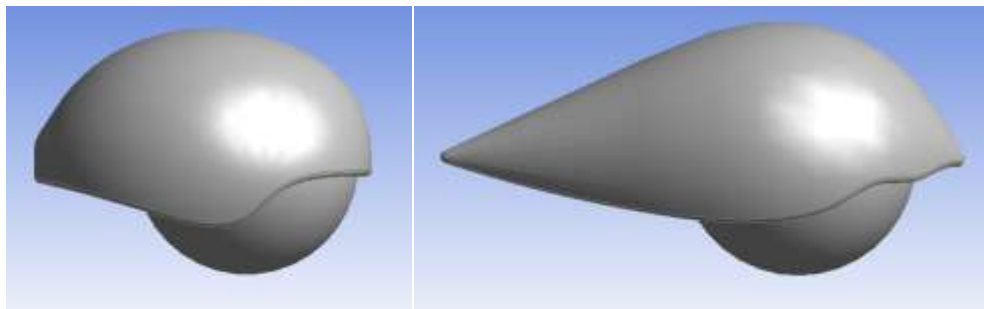
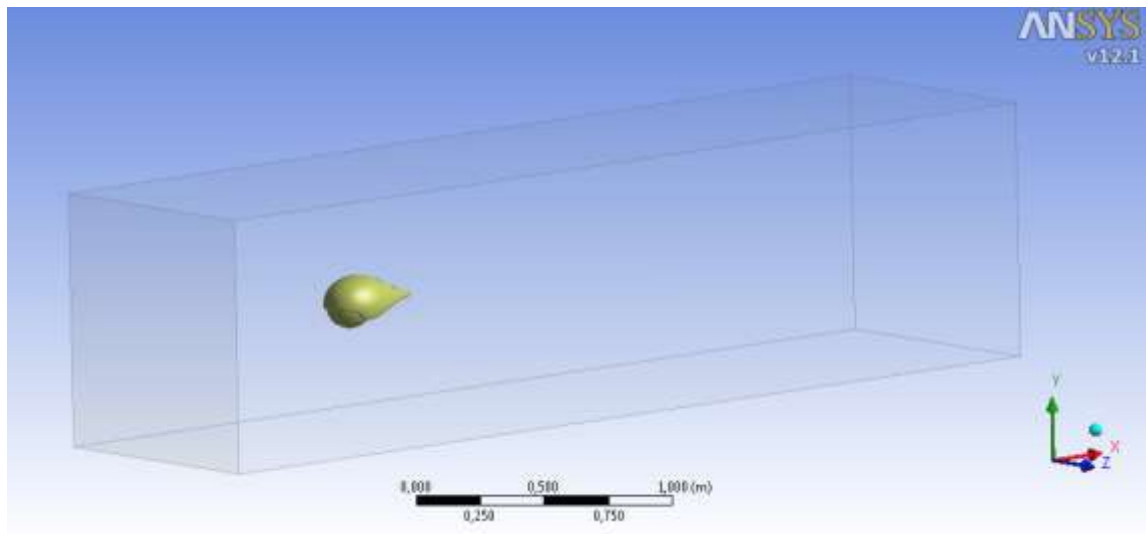


Figura 12: 10° (esquerda) e 11° capacete (direita).

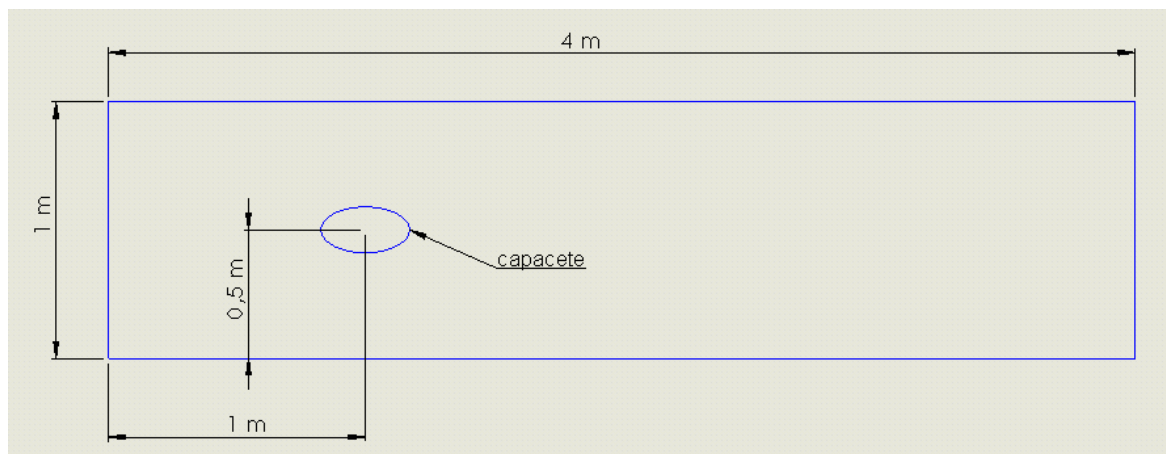
### 4.3 DOMÍNIO DE INTEGRAÇÃO

Para simular o escoamento em torno do capacete, foi criado em 3D no ANSYS *Workbench DesignModeler* uma espécie de túnel de vento virtual designado por domínio de integração, com o capacete colocado no seu interior, na qual foi removido o capacete através do comando *Body operation*, criando assim um *blunt body* (corpo oco), encontrando-se este envolvido por fluido (Figura 13).



**Figura 13: Domínio integração criado para a simulação do escoamento.**

As dimensões do domínio de integração apresenta 1 m a montante do capacete e 3 m a jusante, de modo a que o escoamento se desenvolva depois de passar sobre o mesmo (Figura 14).



**Figura 14: Representação esquemática das dimensões do domínio computacional.**

#### 4.4 GERAÇÃO E ESCOLHA DA MALHA

Na geração da malha foi usado uma malha tetraédrica, pois esta é a mais que se adapta para a geometria do capacete (Figura 15). O método utilizado para a malha foi o *patch conforming*. Foram testados vários tipos de malha, nomeadamente uma malha grossa, média e fina (Figura 15, 16 e 17, respectivamente) através da opção *relevance center* situada nos detalhes da malha (*details mesh*).

De notar que estes ensaios para testar a malha mais adequada foram realizados apenas para um capacete (neste caso foi o 7º capacete), de maneira a compreender a influência dos vários tipos de malha nos parâmetros mais importantes (neste caso no valor de  $C_d$ ).

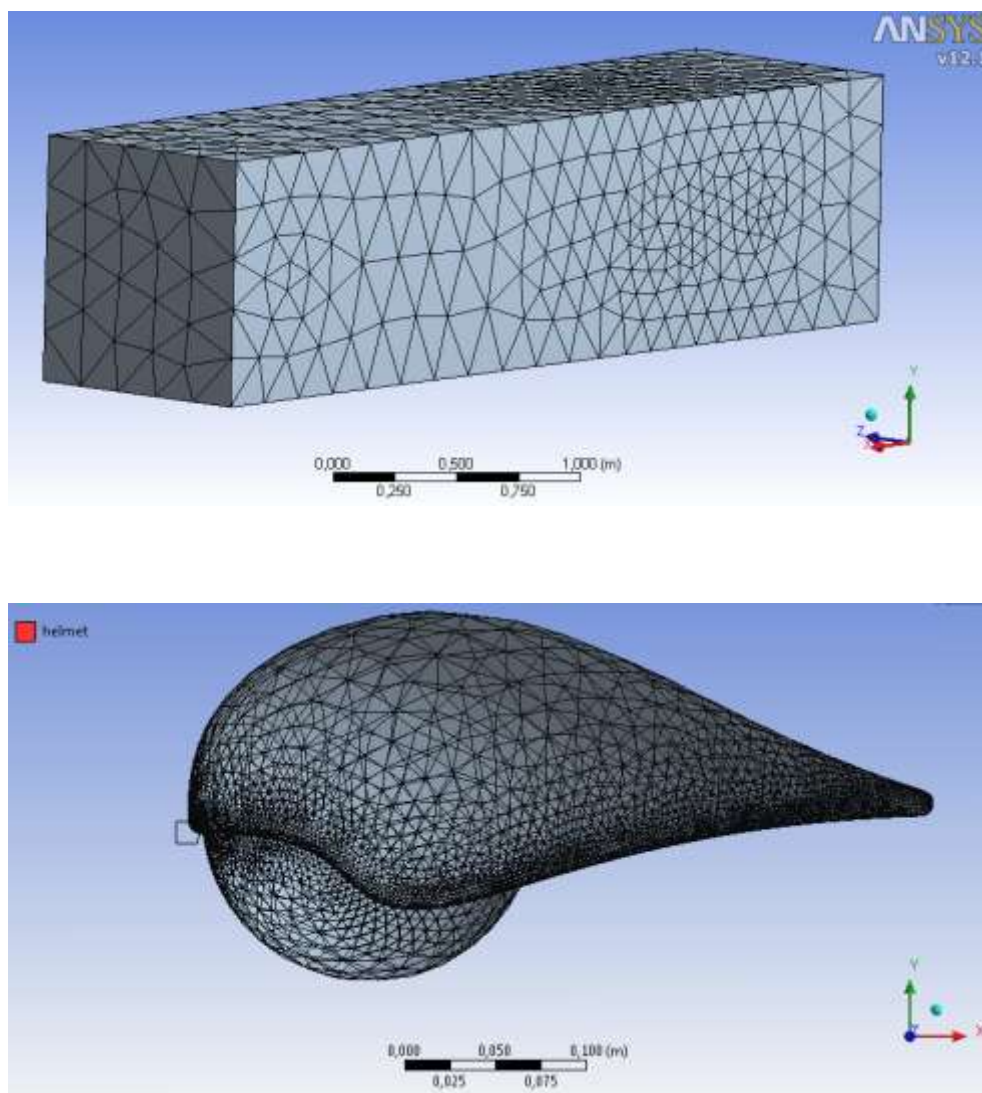
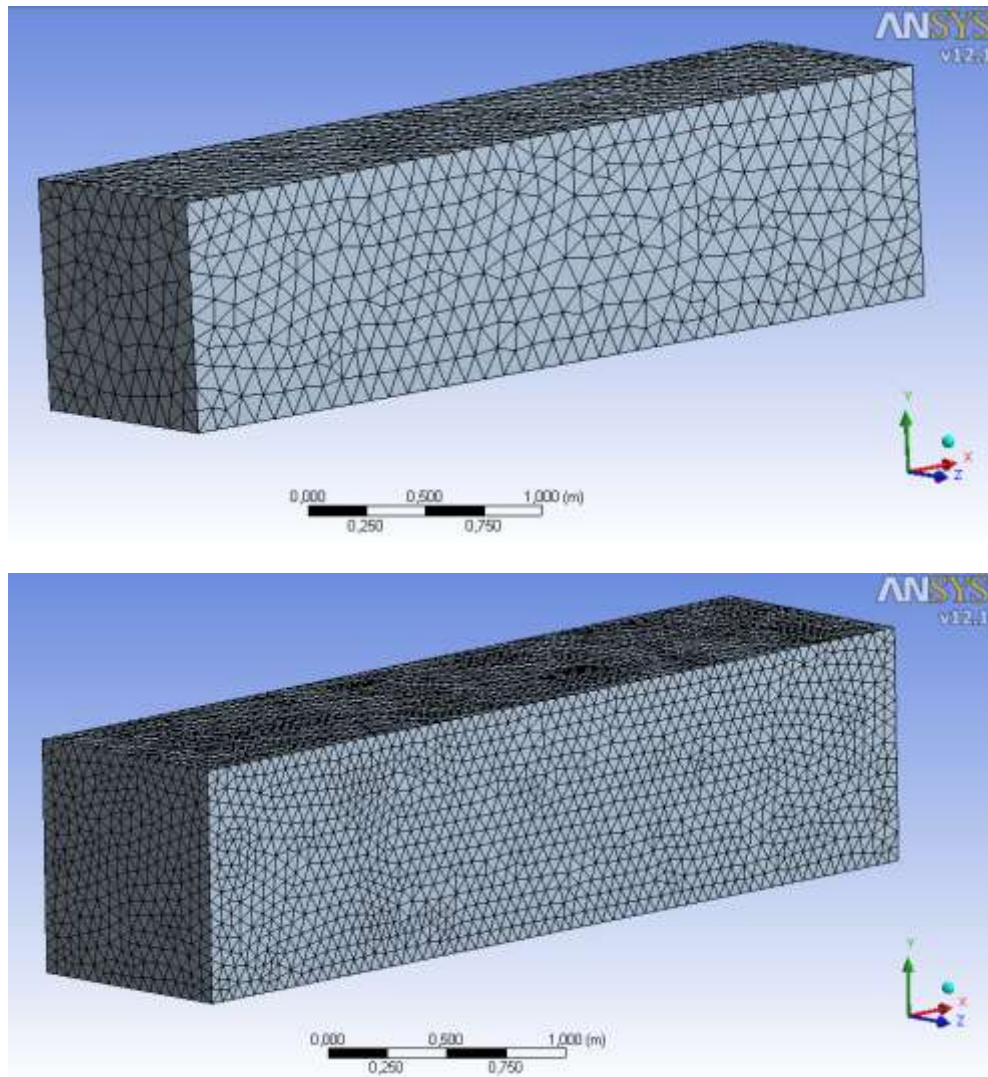


Figura 15: Aspecto da malha grossa gerada no domínio considerado (cima) e em torno do capacete 7 (baixo).



**Figura 16: Aspecto da malha média (cima) e fina (baixo).**

Estes três tipos de malha apresentam vários tamanhos relativamente ao número de elementos e ao número de nós (Tabela 1). Obviamente que, quanto mais refinada é a malha, mais precisos serão os resultados obtidos, embora o tempo de computação seja maior, por isso é necessário ter em conta o tipo de malha e o seu tamanho, de modo a apresentar a melhor qualidade possível.

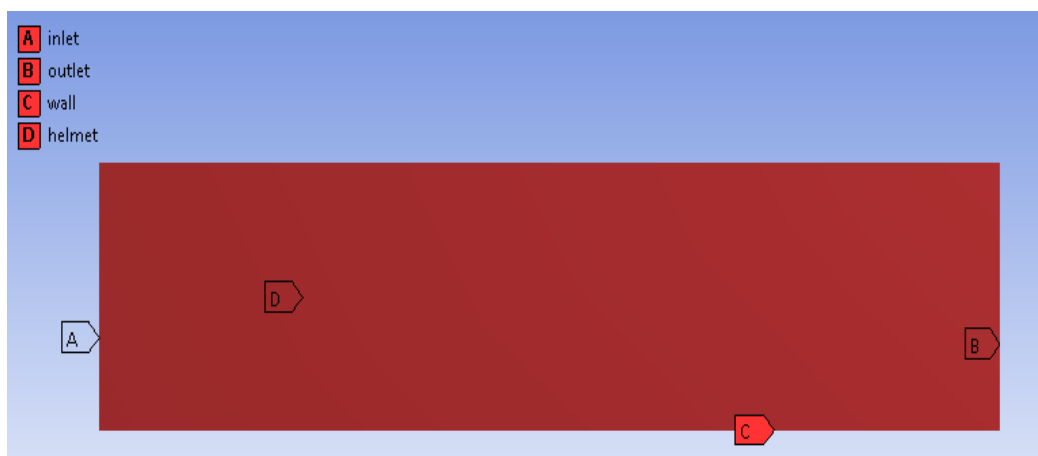


**Tabela 2: - Características e qualidade dos vários tipos de malha testados no capacete 7 para a posição 1 (0°).**

Malha	Características da malha		Qualidade da malha		
	Elementos	Nós	<i>Maximum cell squish</i>	<i>Maximum cell skewness</i>	<i>Maximum aspect ratio</i>
Grossa	327255	58553	0,76	0,80	15,25
Média	345770	62168	0,72	0,80	15,94
Fina	444676	80314	0,75	0,84	16,80

#### 4.4.1 CONDIÇÕES DE FRONTEIRA DO DOMÍNIO

Para simular o escoamento foi necessário criar várias regiões para impor as condições de fronteira para o escoamento, sendo estas a entrada (*inlet*) e a saída (*outlet*) do escoamento, o capacete (*helmet*) e as paredes (*wall*), como é possível ver na Figura 17.



**Figura 17: Regiões criadas para as condições de fronteira do problema em estudo através da opção *Named selections*.**

#### 4.4.2 CONDIÇÕES IMPOSTAS PARA A SIMULAÇÃO NO FLUENT

Os vários tipos de malha testados, foram ensaiadas no FLUENT com o objectivo de encontrar a melhor malha que se adeque ao objecto em estudo, tendo em conta a qualidade dos resultados e o tempo de computação.



Para esta simulação o modelo de turbulência utilizado foi o *standard k-ε*, tendo sido utilizado o *standard wall functions* (funções de parede padrão) como *near wall treatment* (permite obter previsões razoáveis para elevados valores de  $Re$ , para paredes delimitadas pelo escoamento). A densidade do ar mantém-se constante igual a  $1,225 \text{ kg/m}^3$  e uma viscosidade dinâmica de  $1.7894 \times 10^{-5} \text{ kg/m.s}$ . A temperatura considerada foi de  $20^\circ\text{C}$  ( $293,15 \text{ K}$ ) e uma pressão de  $1 \text{ atm}$  ( $101325 \text{ Pa}$ ). Quanto às condições de fronteira, na região de entrada definiu-se uma velocidade de entrada uniforme igual a  $13,9 \text{ m/s}$  (cerca de  $50 \text{ km/h}$ ), sendo esta a velocidade média dos ciclistas nas provas de contra-relógio. O valor de intensidade de turbulência definido foi de  $0,3\%$  de acordo com um artigo publicado (Chabroux et al., 2009), em que o ensaio dos vários modelos de capacetes em túnel de vento, foi utilizado uma intensidade de turbulência inferior a  $0,3\%$ .

A saída do escoamento foi definido como pressão de saída (*pressure outlet*) com um valor de pressão estática igual a zero. As paredes do domínio de integração foram definidas com escorregamento com tensão de corte nula, de modo a ter a mínima influência no escoamento e a superfície do capacete considerou-se as condições de não escorregamento.

No comando *reference values* (valores de referência) vários valores foram impostos, nomeadamente a área, que corresponde à área frontal projectada do capacete, a densidade do ar, a temperatura e a velocidade do escoamento, sendo calculados os parâmetros importantes ( $C_d$ ) a partir do capacete e tendo como região de referência o fluido.

Foi escolhido o esquema “SIMPLE” como método de solução e as equações utilizadas no estudo foram discretizadas como sendo de segunda ordem (*second order upwind*).

O parâmetro de interesse no estudo é o coeficiente de resistência aerodinâmica, pelo que foi necessário activar este comando no *monitors*. Uma vez que a velocidade do vento tinha uma direcção horizontal, positiva no sentido do eixo do  $x$ , o vector força foi definido como  $1$  em  $x$ , e foi escolhido a região do capacete, pois é a zona que pretende-se calcular o coeficiente de resistência aerodinâmica.

De seguida foi iniciada a solução, calculada a partir da condição fronteira *inlet* e depois procedeu-se ao cálculo de execução.

#### **4.4.3 RESULTADOS OBTIDOS E CONCLUSÃO RELATIVO À ESCOLHA DA MALHA**

Os resultados obtidos no Fluent para o coeficiente de resistência aerodinâmica dos três tipos de malhas foram aproximadamente iguais, tendo-se obtido valores de  $0,35$ ,  $0,36$  e  $0,36$  para a malha grossa, média e fina, respectivamente. Tendo em conta que os valores de coeficiente de resistência aerodinâmica foram semelhantes, optou-se por utilizar uma malha grossa, pois o tempo de computação no FLUENT era consideravelmente menor (cerca de  $90$  minutos) em relação às outras malhas, que demoravam muito mais tempo. O cálculo foi efectuado para um critério de convergência inferior a  $0,001$ , o suficiente para verificar que os residuais das diversas equações como também o coeficiente de resistência aerodinâmica se mantinham praticamente constantes.

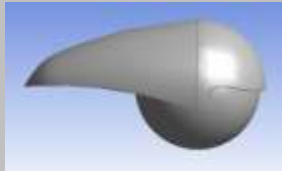
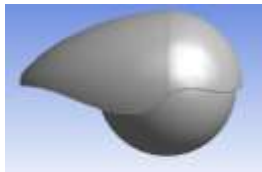
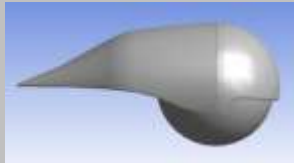
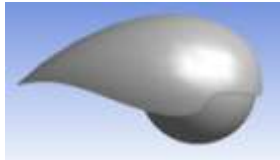

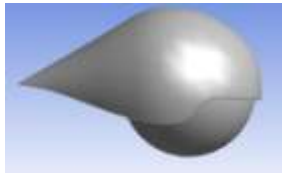
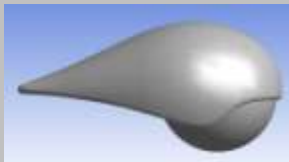
## 5. ANÁLISE DOS RESULTADOS

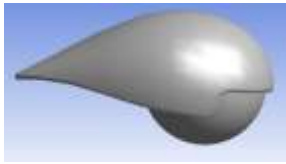

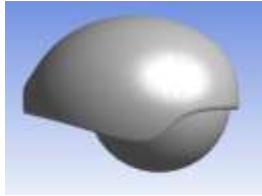
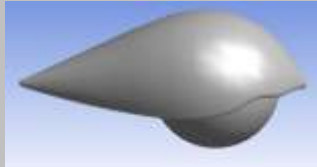
Após ter escolhido a malha a utilizar, os ensaios para os 11 capacetes foram realizados todos com a malha grossa, pois como foi dito anteriormente os resultados não diferenciavam muito nas três malhas ensaiadas. As condições impostas no FLUENT para todos os capacetes simulados foram feitas de maneira semelhante referidas no subcapítulo 4.4.2.

Neste capítulo são apresentados os resultados para cada capacete simulado nas três diferentes posições. A Tabela 2 apresenta os valores de coeficiente de resistência aerodinâmica, força de resistência aerodinâmica e a respectiva área frontal de cada capacete nas três posições simuladas.

Os resultados foram obtidos com um critério de convergência inferior a 0,001 para todas as equações utilizadas, pois foi possível observar que o valor de coeficiente de resistência aerodinâmica mantinha-se praticamente constante a partir de um certo número de iterações.

**Tabela 3: Características dos capacetes e valores obtidos de Cd e D.**

Número	Forma	Comprimento da cauda (cm)	Área frontal (m <sup>2</sup> )	Cd	D (N)
1		16	Posição:	Posição:	Posição:
			1- Ap=0,030	1- Cd=0,429	1- D=1,506
			2- Ap=0,036	2- Cd=0,503	2- D=2,134
			3- Ap=0,046	3- Cd=0,631	3- D=3,436
2		10	Posição:	Posição:	Posição:
			1- Ap=0,029	1- Cd=0,377	1- D=1,307
			2- Ap=0,033	2- Cd=0,411	2- D=1,622
			3- Ap=0,039	3- Cd=0,546	3- D=2,513
3		22	Posição:	Posição:	Posição:
			1- Ap=0,030	1- Cd=0,396	1- D=1,396
			2- Ap=0,037	2- Cd=0,480	2- D=2,094
			3- Ap=0,050	3- Cd=0,619	3- D=3,642
4		20	Posição:	Posição:	Posição:
			1- Ap=0,034	1- Cd=0,359	1- D=1,431
			2- Ap=0,043	2- Cd=0,470	2- D=2,371
			3- Ap=0,055	3- Cd=0,641	3- D=4,171
5		18	Posição:	Posição:	Posição:
			1- Ap=0,032	1- Cd=0,383	1- D=1,452
			2- Ap=0,032	2- Cd=0,556	2- D=2,107
			3- Ap=0,039	3- Cd=0,506	3- D=2,350
6		14	Posição:	Posição:	Posição:
			1- Ap=0,034	1- Cd=0,377	1- D=1,512
			2- Ap=0,034	2- Cd=0,556	2- D=2,228
			3- Ap=0,044	3- Cd=0,573	3- D=2,975
7		22	Posição:	Posição:	Posição:
			1- Ap=0,033	1- Cd=0,354	1- D=1,398
			2- Ap=0,040	2- Cd=0,411	2- D=1,966
			3- Ap=0,054	3- Cd=0,552	3- D=3,530

<b>8</b>		<b>22</b>	Posição:	Posição:	Posição:
			1- $A_p=0,032$	1- $C_d=0,350$	1- $D=1,309$
			2- $A_p=0,039$	2- $C_d=0,438$	2- $D=1,998$
			3- $A_p=0,050$	3- $C_d=0,587$	3- $D=3,485$
<b>9</b>		<b>20</b>	Posição:	Posição:	Posição:
			1- $A_p=0,032$	1- $C_d=0,344$	1- $D=1,287$
			2- $A_p=0,038$	2- $C_d=0,492$	2- $D=2,233$
			3- $A_p=0,051$	3- $C_d=0,511$	3- $D=3,086$
<b>10</b>		<b>9</b>	Posição:	Posição:	Posição:
			1- $A_p=0,033$	1- $C_d=0,379$	1- $D=1,495$
			2- $A_p=0,038$	2- $C_d=0,473$	2- $D=2,133$
			3- $A_p=0,043$	3- $C_d=0,476$	3- $D=2,414$
<b>11</b>		<b>22</b>	Posição:	Posição:	Posição:
			1- $A_p=0,032$	1- $C_d=0,331$	1- $D=1,251$
			2- $A_p=0,036$	2- $C_d=0,398$	2- $D=1,673$
			3- $A_p=0,046$	3- $C_d=0,506$	3- $D=2,747$

A área frontal aumenta à medida que o ângulo de inclinação da cabeça aumenta, embora nalguns casos a mudança da posição de um ângulo para outro, a área frontal manteve-se igual, (como por exemplo o 6º capacete), pois este capacete tinha uma cauda pequena.

Na Figura 18 é apresentado um gráfico de barras dos valores de  $C_d$  em função da posição do capacete, dos diversos capacetes, em que cada um corresponde a um código de cores, repetindo-se essa mesma cor em cada posição.

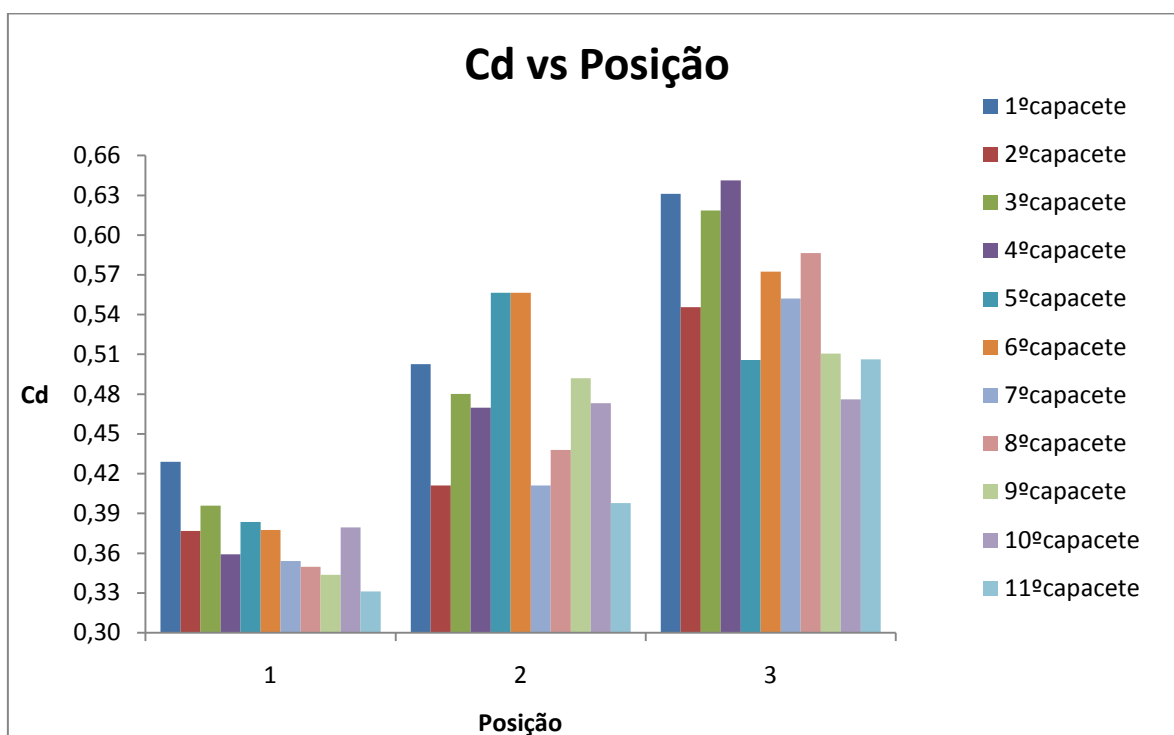


Figura 18: Valores de Cd para cada capacete nas três posições.

## 5.1 CAPACETE NA POSIÇÃO 1 (0°)

Na posição 1 (0°) o capacete mais aerodinâmico foi o 11º capacete e o menos aerodinâmico foi o 1º. O 11º capacete tem um valor força de resistência aerodinâmica igual a 1,251 N, enquanto o menos aerodinâmico (1º) tem um valor de 1,506 N. O capacete mais aerodinâmico (11º) tem a característica de apresentar um perfil pontiagudo na parte da frente e além disso tem uma cauda de comprimento aproximadamente de 22 cm (cerca de 19 cm é o comprimento da cabeça, o que corresponde a um comprimento total de 41 cm) e comparativamente ao 7º e 8º capacete que também têm aproximadamente o mesmo comprimento de cauda, mas a parte da frente é arredondada, pode-se ver que a resistência aerodinâmica é maior em relação ao 11º, concluindo assim que é preferível ter uma forma mais bicuda na parte da frente. Os capacetes em que a parte da cauda foi encurtada, que é o caso do 2º, 6º e o 10º capacetes os valores de Cd foram relativamente superiores comparados com os capacetes com cauda maior, por exemplo o 10º capacete tem um valor de Cd igual 0,379 e o 9º capacete com a cauda maior apresenta um Cd de 0,344. O 3º capacete tem um comprimento de cauda cerca de 22 cm, igual como por exemplo ao 8º capacete, com uma parte da frente redonda sendo que a única diferença reside na forma da cauda em que o 3º apresenta uma descontinuidade a meio da cauda, e como é possível constatar o valor de Cd deu maior (igual a 0,396), sendo por isso indesejável usar uma descontinuidade ao longo desta.

Na Figura 19 encontra-se apresentado para o capacete 11 a gama de valores dos contornos de pressão estática na superfície do mesmo. Verifica-se um valor máximo de pressão estática (diferença entre a pressão absoluta na superfície e a pressão ambiente) na parte da frente, mais precisamente na zona pontiaguda apresentando um valor de 198 Pa. Por outro lado na parte da cauda do capacete as pressões estáticas são bem menores (atingindo valores negativos). Através da criação de um plano xy colocado na origem do sistema de eixos (Figura 20), observa-se baixas pressões na parte de cima do capacete e parte de baixo referente à esfera.

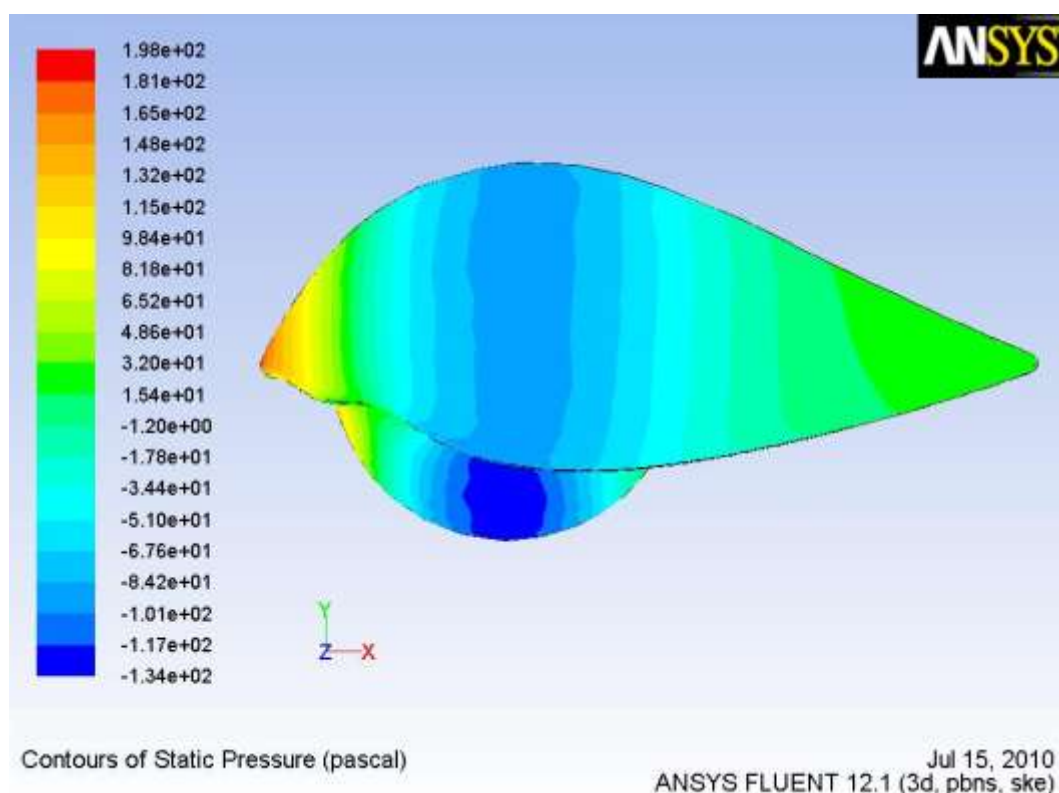


Figura 19: Contornos de pressão estática no capacete 11.

A resistência aerodinâmica que ocorre no capacete é devido à diferença de pressão que se verifica (grandes pressões à frente e baixas pressões atrás do capacete) ao longo do mesmo, causada pela forma do capacete. A resistência aerodinâmica devido ao atrito na superfície não tem grande influência, pois o capacete foi considerado como um corpo liso (o que não corresponde à realidade, pois a superfície do capacete apresenta alguma rugosidade, embora pequena) e mesmo que tivesse alguma rugosidade o valor de resistência aerodinâmica devido ao atrito viscoso na superfície ia ser pequeno, uma vez que a maior parte da resistência aerodinâmica é devido à pressão.

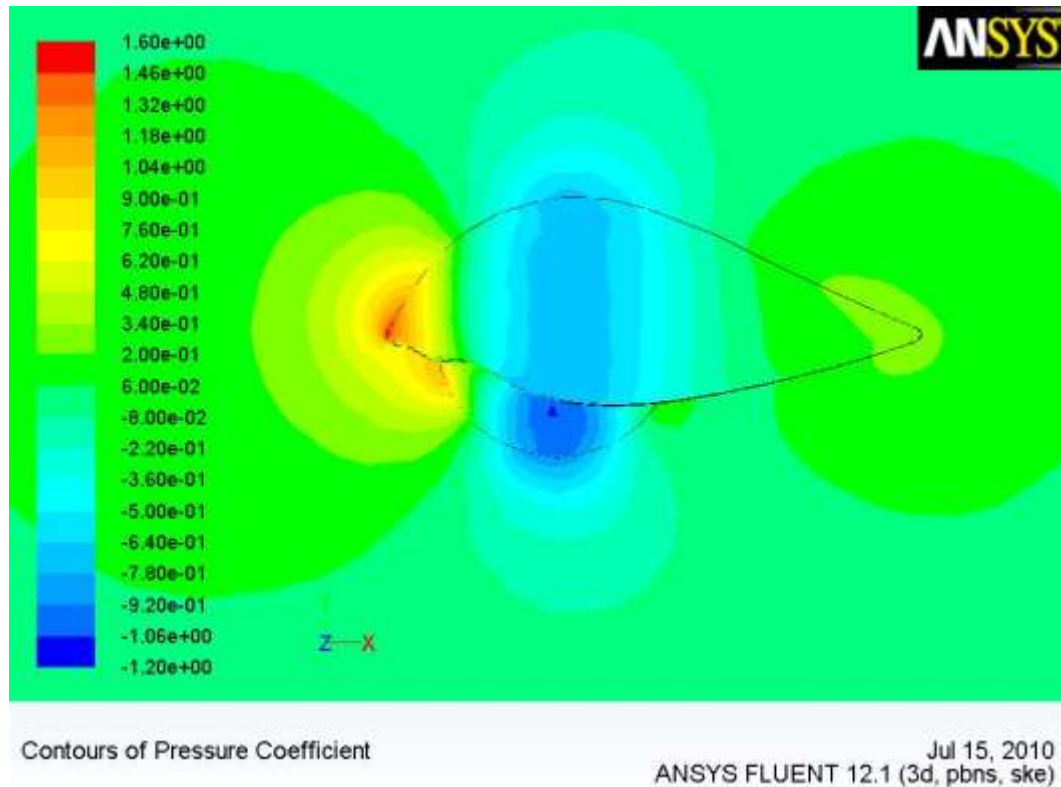


Figura 20: Contornos de coeficiente de pressão no domínio de integração do capacete 11.

O coeficiente de pressão ( $C_p$ ) é um parâmetro adimensional definido pela razão entre a pressão estática e a pressão dinâmica. O coeficiente de pressão é calculado pela seguinte expressão:

$$C_p = \frac{(p_{sup} - p_0)}{(\rho U^2 / 2)} \quad (16)$$

Considerando o mesmo plano criado mas para os contornos de velocidade (Figura 21), pode-se observar uma maior velocidade na parte superior do capacete e na parte inferior referente à esfera, pois as linhas de escoamento tendem a convergir nessas zonas sendo propício o aumento da velocidade (logo as pressões são menores como é possível ver na Figura 20). Na parte frontal há um decréscimo da velocidade, havendo assim um aumento da pressão, como foi dito anteriormente. Por sua vez a energia cinética do escoamento na região da esteira é baixa.

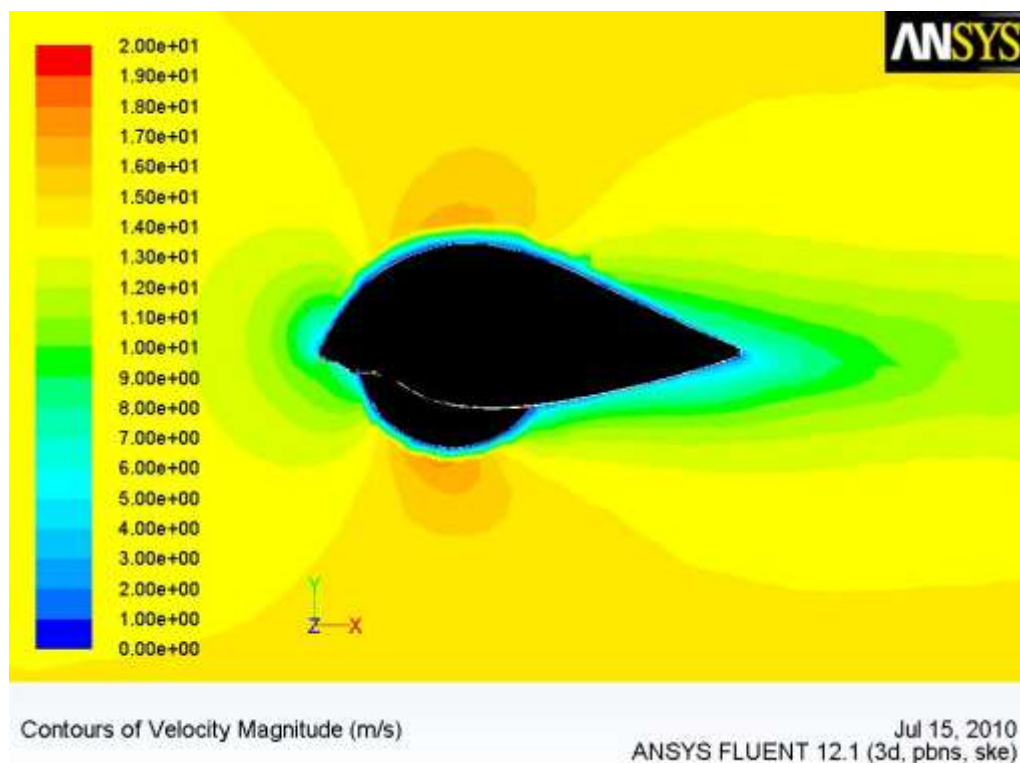


Figura 21: Contornos de velocidade no domínio de integração do capacete 11.

Analisando o capacete mais aerodinâmico (11) foi possível constatar que o escoamento é pouco perturbado ao longo deste e a jusante, verifica-se também que na zona da esteira não existe formação de vórtices (Figura 22 e 23). Em comparação com o menos aerodinâmico (1) foi possível observar que a descontinuidade na parte final da cauda provoca o descolamento do fluido na superfície do capacete, sendo mais susceptível provocar maior turbulência na região da esteira (Figura 24 e 25). As laterais do capacete na região onde se encontra as orelhas, para o caso do capacete 1, verifica-se que a forma desenhada (Figura 9, esquerda) provoca pequenos vórtices ao longo da parte inferior da cauda (Figura 25) enquanto no capacete 11, o perfil desenhado nessa zona (Figura 12, direita) não provoca formação de vórtices, verificando-se um escoamento pouco perturbado na esteira.



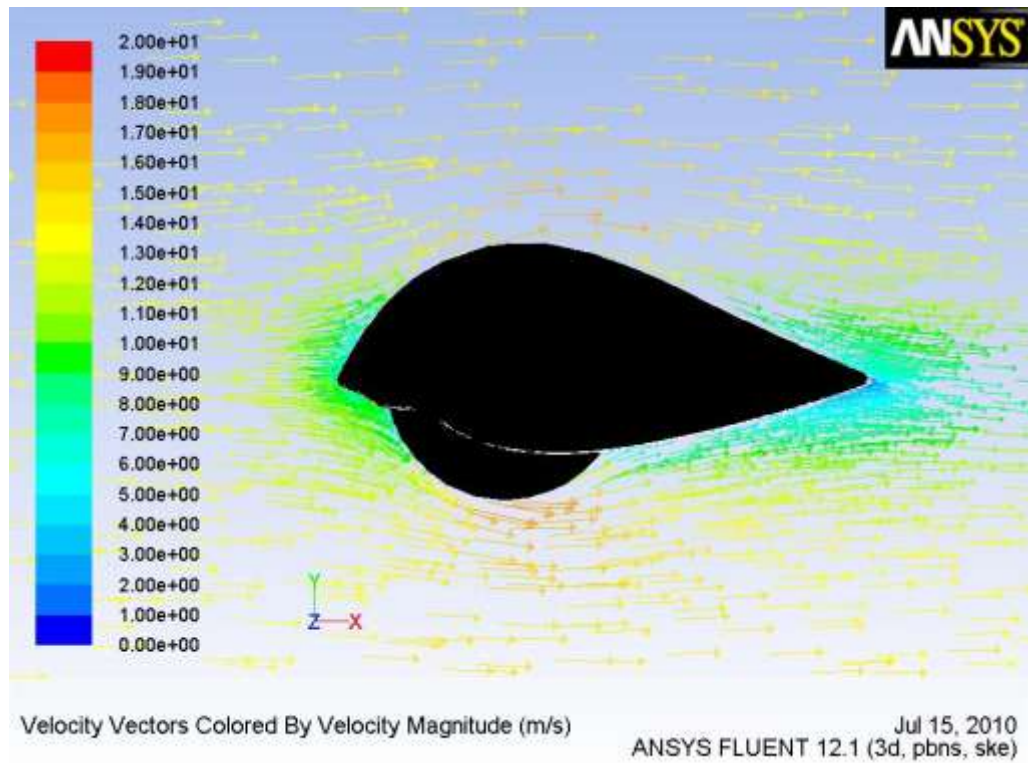


Figura 22: Vectors de velocidade para o capacete 11.

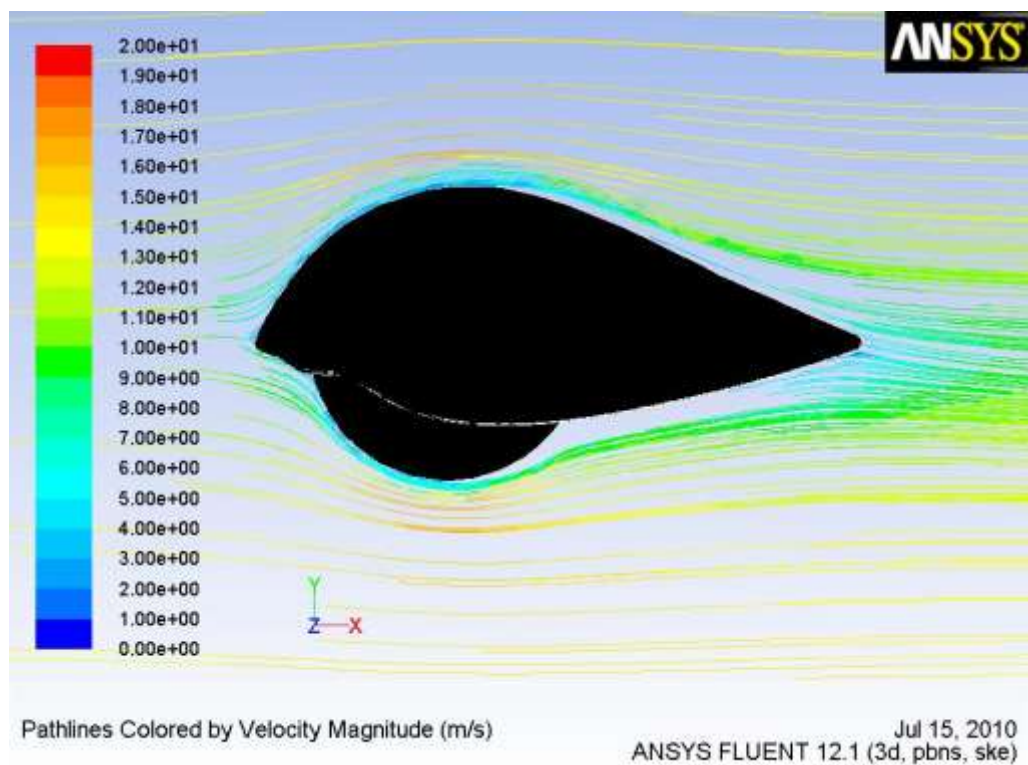


Figura 23: Linhas de corrente do escoamento para o 11º capacete (mais aerodinâmico).

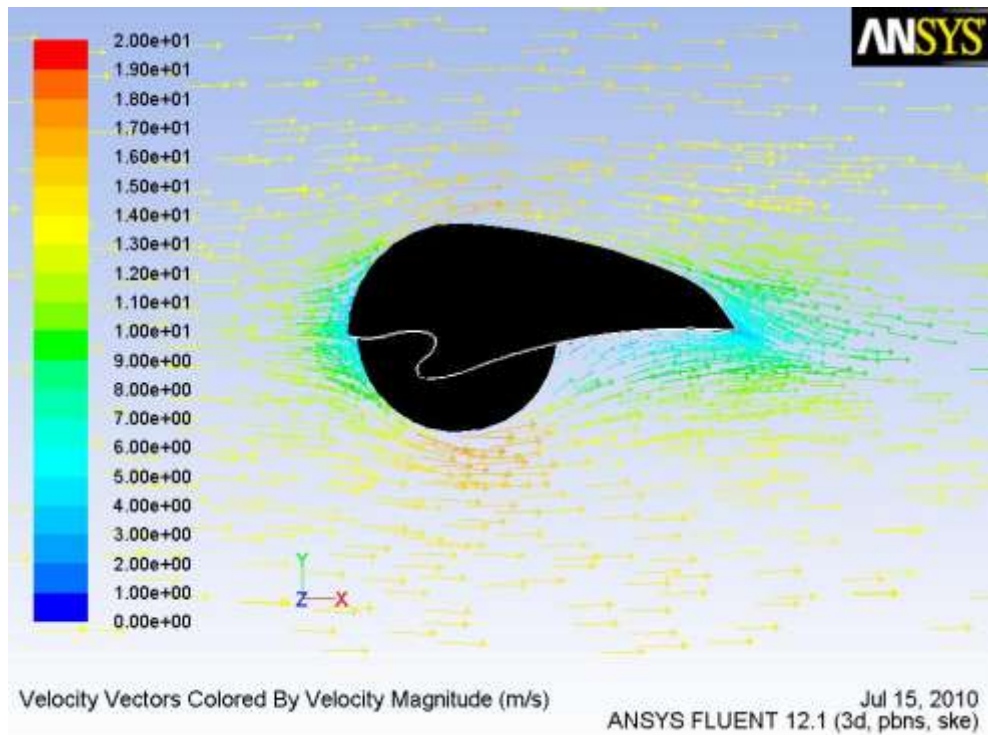


Figura 24: Vectors de velocidade para o capacete 1.

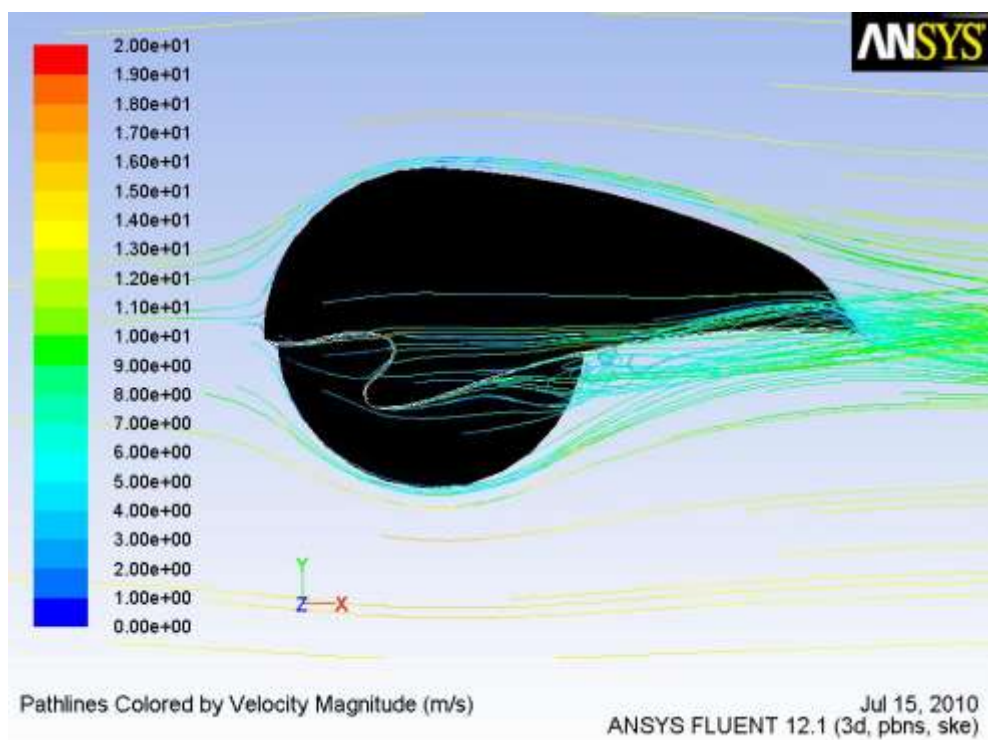


Figura 25: Linhas de corrente do escoamento para o 1º capacete (menos aerodinâmico).

## 5.2 CAPACETE NA POSIÇÃO 2 (30°)

Na posição 2 o capacete mais aerodinâmico corresponde mais uma vez ao capacete 11, que apresenta um valor indicado na Tabela 2 de coeficiente de resistência aerodinâmica igual a 0,398 e força de resistência aerodinâmica 1,673 N. O capacete menos aerodinâmico foi o capacete 6 com um valor de coeficiente de resistência aerodinâmica de 0,570 (de notar que este capacete era um dos que apresentava uma cauda mais curta, cerca de 14 cm), sendo que o capacete que apresentava a cauda mais curta (10) ficou com um coeficiente de resistência aerodinâmica de 0,473.

A pressão na superfície pode ser expressa através do parâmetro adimensional coeficiente de pressão ( $C_p$ ), verifica-se maiores  $C_p$  na frente superior do capacete e menores atrás na zona da cauda (Figura 26).

O movimento da cabeça para esta posição provoca um aumento da área frontal projectada do capacete, verificando-se assim maiores valores de  $C_d$  e  $D$ . Nesta posição existe uma maior turbulência na parte da esteira, apresentando uma esteira maior em relação à 1ª posição (Figura 27).

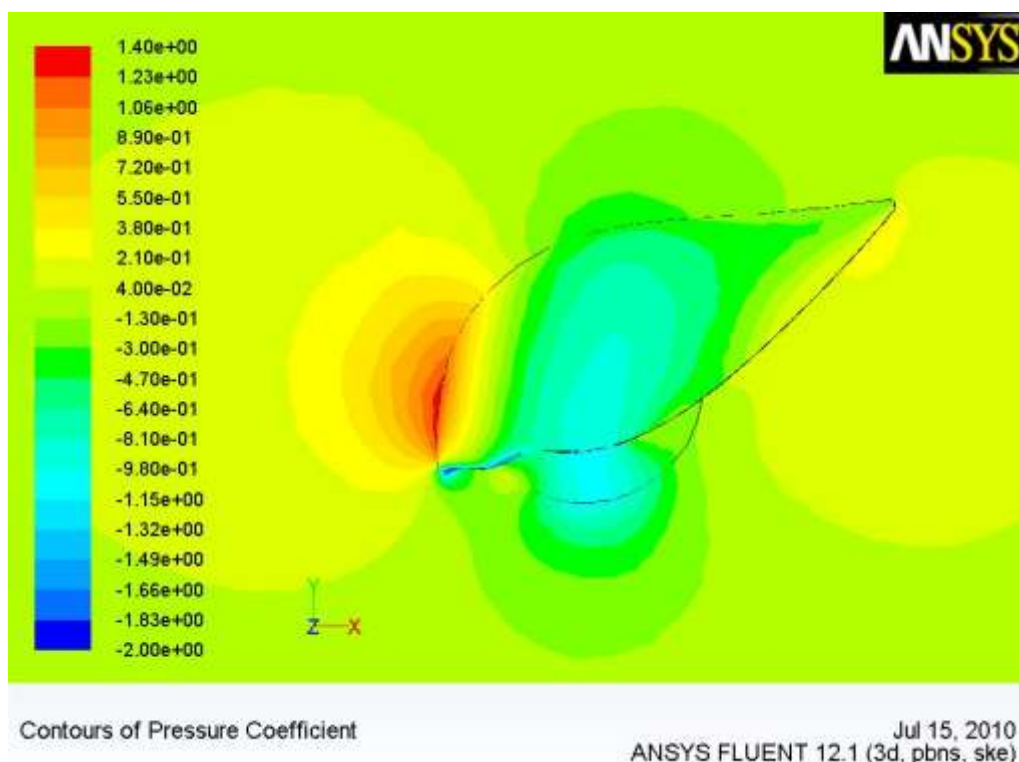


Figura 26: Contornos do coeficiente de pressão na superfície do capacete 11.



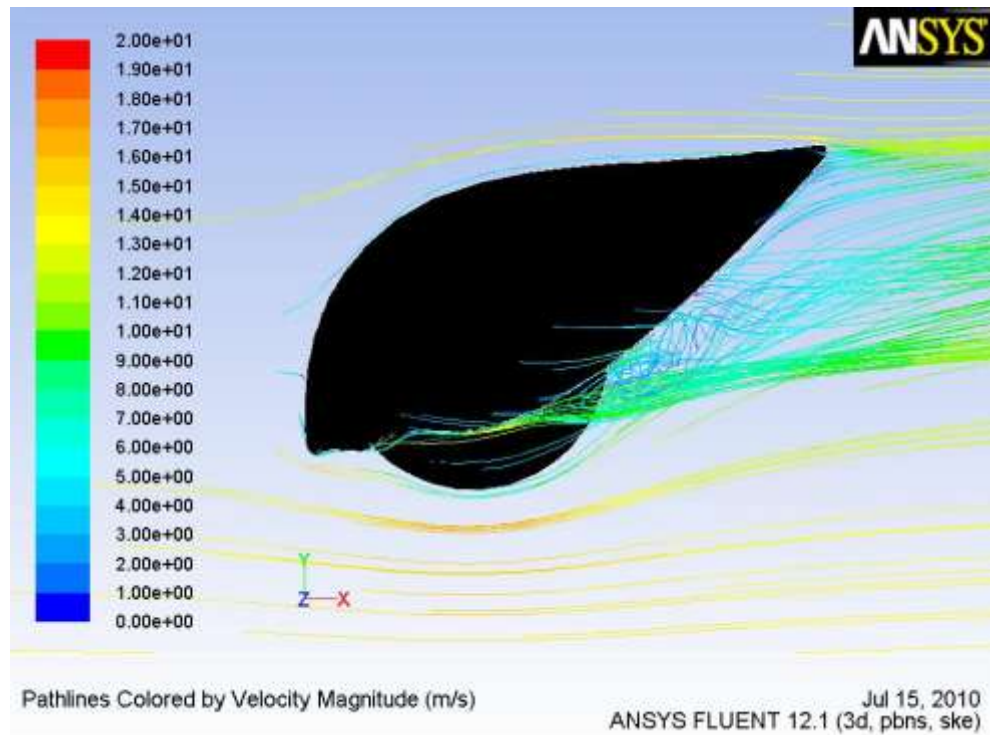


Figura 27: Linhas de corrente do escoamento para o 11° capacete.

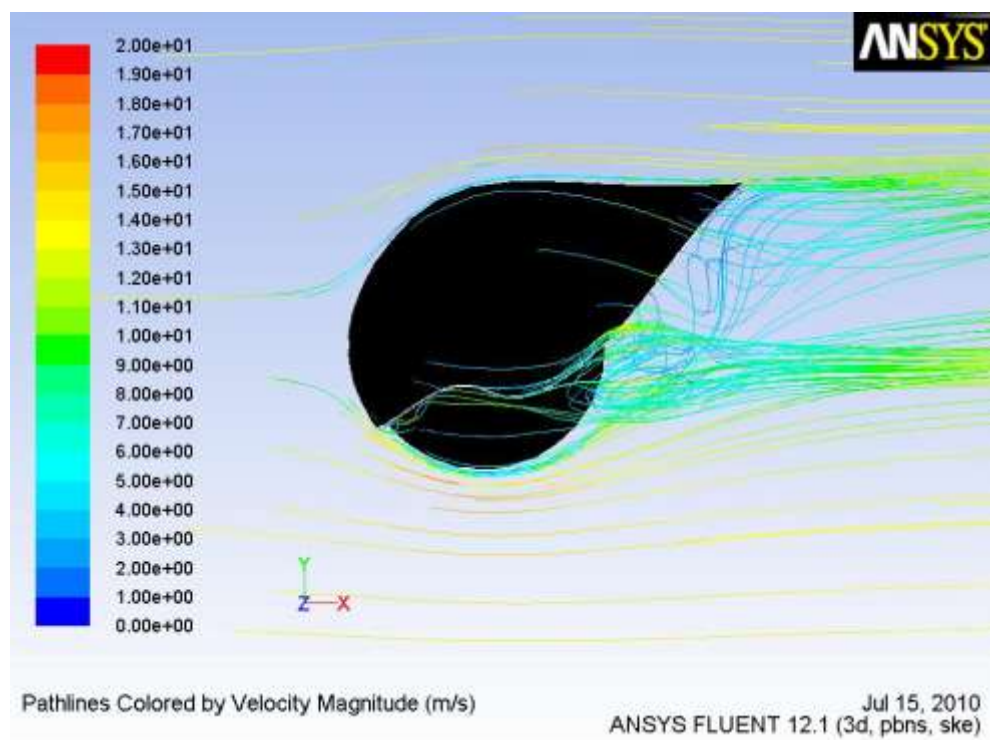
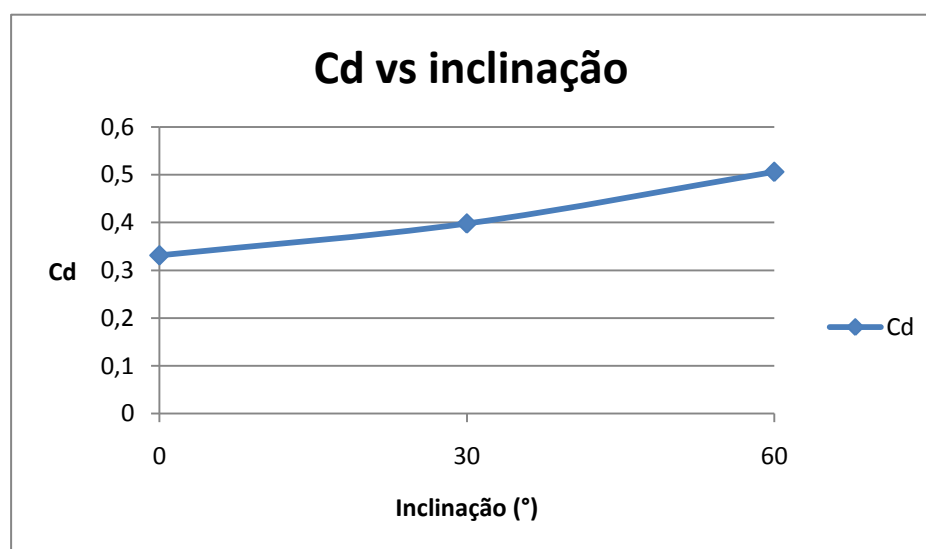


Figura 28: Linhas de corrente do escoamento para o 6° capacete.

Comparando o capacete 6 e 11, através das figuras 27 e 28, as linhas de corrente do escoamento na zona da cauda do capacete 6 é possível observar uma maior turbulência, verificando-se que as linhas de escoamento circulam no sentido oposto ao do movimento (recirculação), visualizando maiores vórtices formados na região da esteira, enquanto no capacete 11 os vórtices formados são pequenos na esteira (Figura 27).

### 5.3 CAPACETE NA POSIÇÃO 3 (60°)

O capacete mais aerodinâmico nesta posição foi o 10° com um valor de  $C_d$  de 0,476 que corresponde ao capacete com a cauda mais curta. O menos aerodinâmico nesta posição foi o 4° capacete com um  $C_d$  de 0,641 (comprimento de cauda cerca de 20 cm).



**Figura 29:** Coeficiente de resistência aerodinâmica em função da inclinação do capacete 11.

De notar que nesta posição os valores de  $C_d$  aumentaram significativamente (Figura 29), isto devido ao aumento da área frontal projectada nesta posição, pois a cauda do capacete encontra-se levantada estando completamente exposta ao vento, o que origina a formação de vórtices, uma vez que existe recirculação de escoamento na esteira que favorece a separação da camada limite. Já era de prever que os capacetes que tinham uma cauda mais pequena apresentassem valores de  $C_d$  mais pequenos em relação à maior parte dos capacetes com uma cauda maior, uma vez que a área frontal era menor.

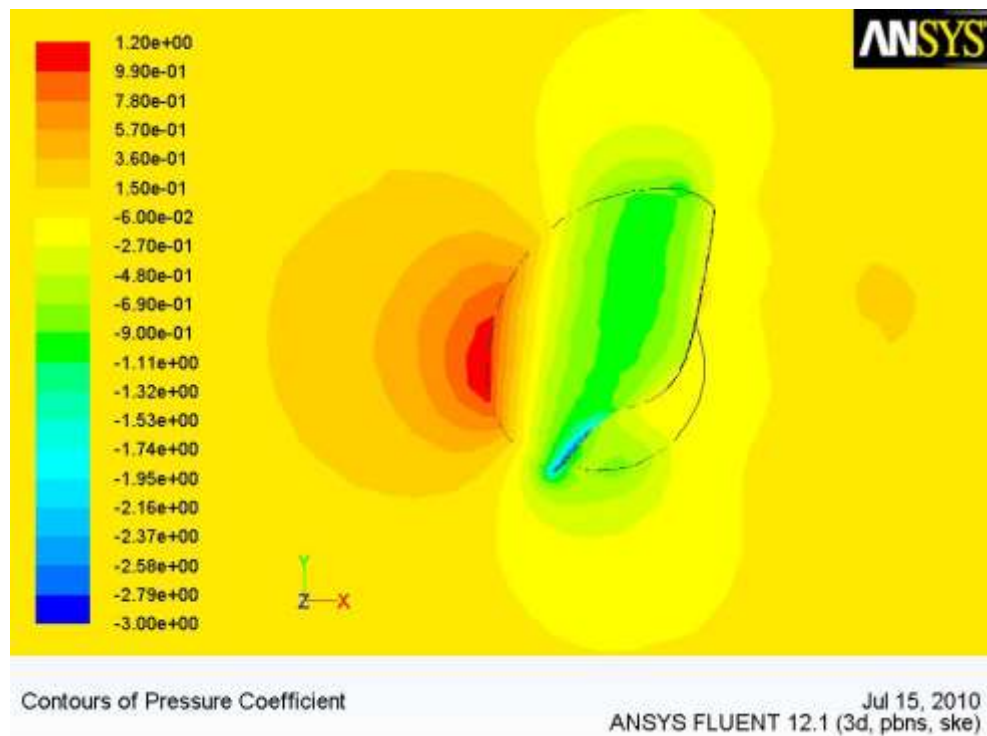


Figura 30: Contornos de coeficiente de pressão para o capacete 10.

Como dito anteriormente para esta posição também se verifica um maior  $C_p$  na parte da frente do capacete e na parte de trás menores  $C_p$  (com valores negativos) sendo a pressão a principal causadora da resistência aerodinâmica, pois a forma do corpo é propícia a tal (Figura 30).

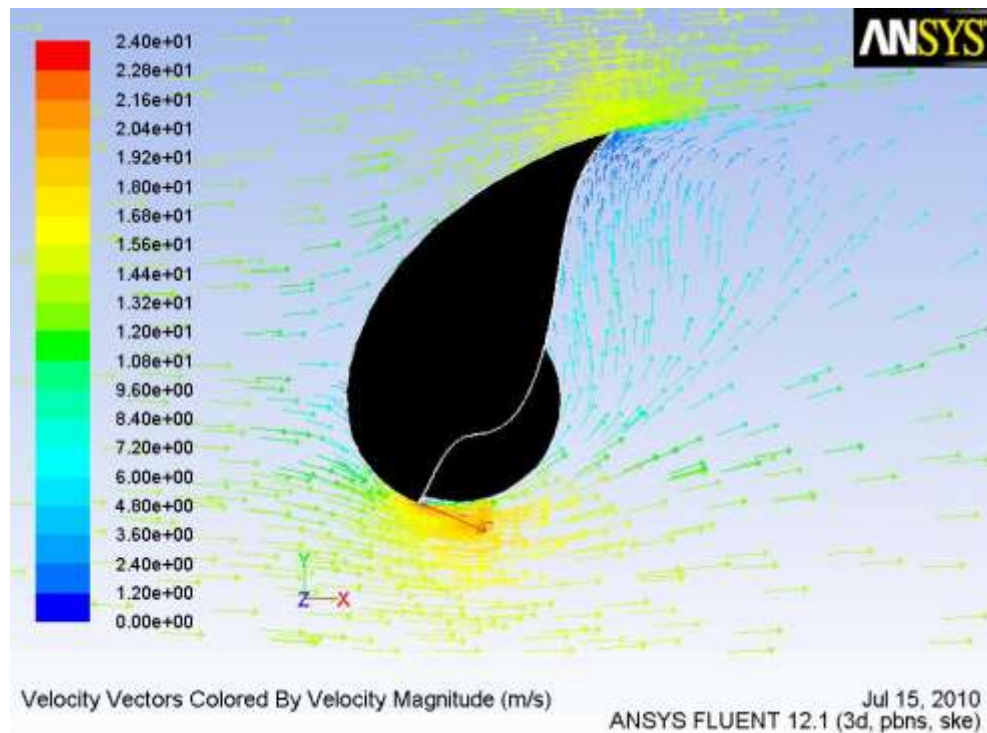


Figura 31: Vectores de velocidade para o capacete 4.

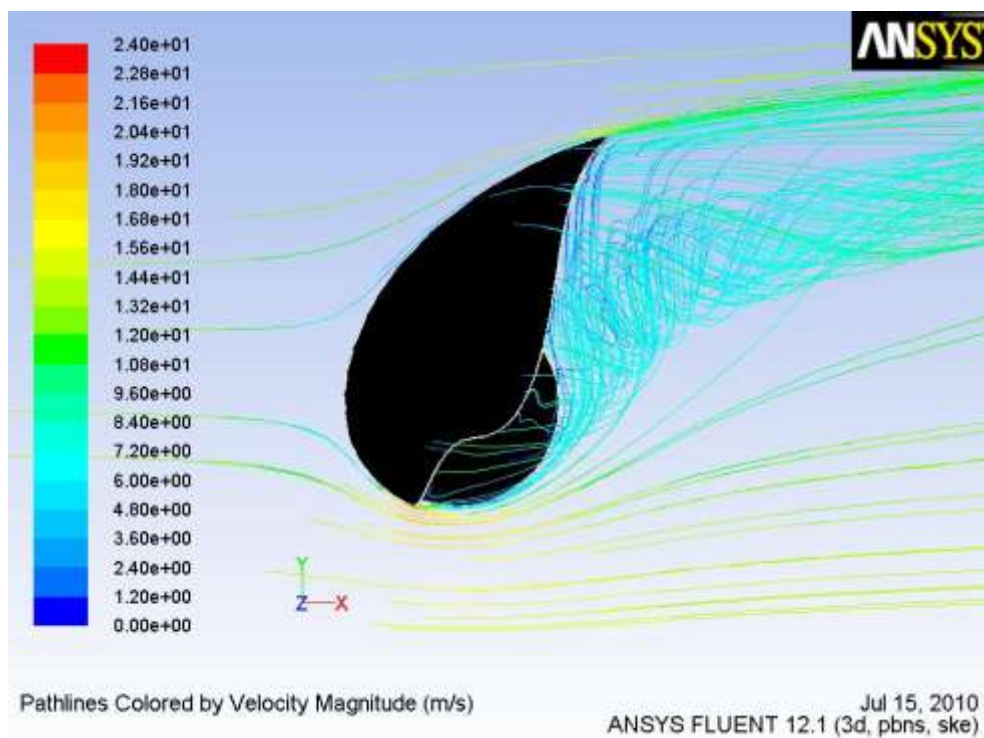


Figura 32: Linhas de corrente do escoamento para o capacete 4.

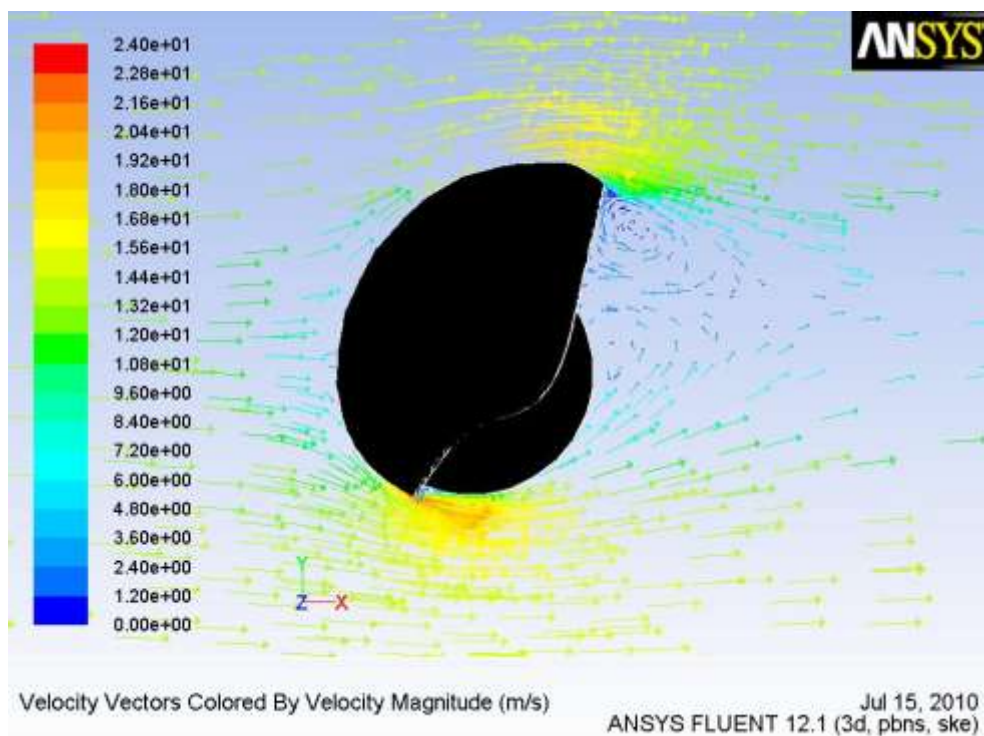
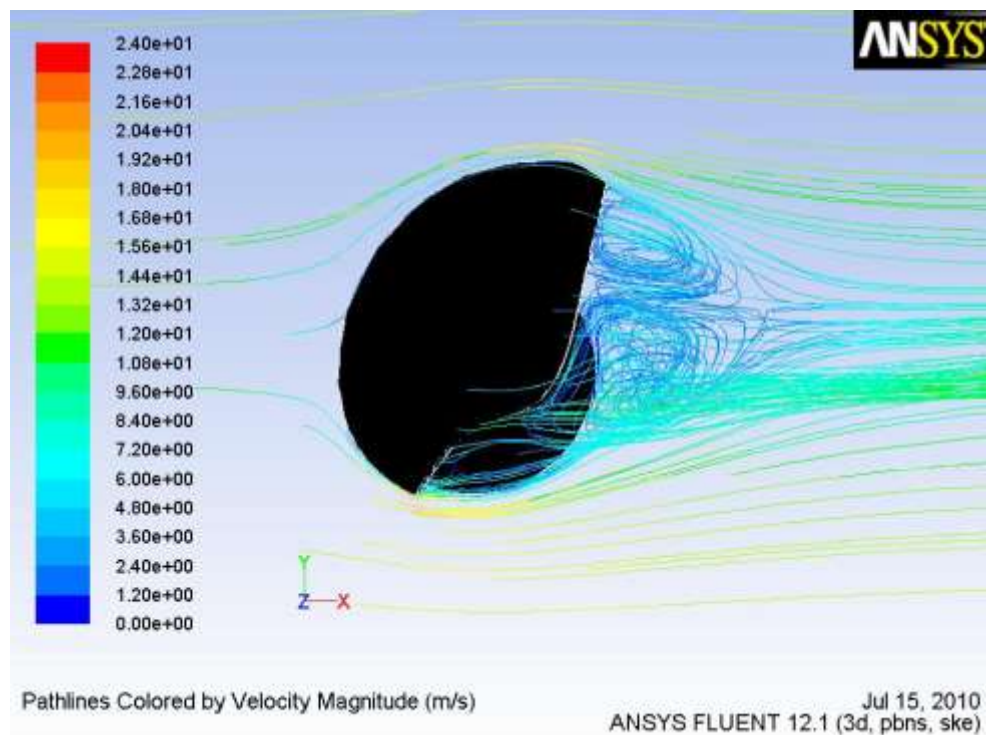


Figura 33: Vectors de velocidade para o capacete 10.





**Figura 34: Linhas de corrente do escoamento para o capacete 10.**

Comparando os capacetes 4 e 10, o menos e o mais aerodinâmico nesta posição, respectivamente, verifica-se através dos vectores e das linhas de corrente do escoamento que no capacete 4 há uma formação de vórtices na esteira do capacete que se prolonga ao longo do escoamento a jusante (Figura 31 e 32), isto acontece porque a área frontal é maior, enquanto no capacete 10 forma-se dois vórtices pequenos na esteira que se dissipam pouco depois (a esteira é mais pequena comparativamente ao capacete 4), o que faz com que o escoamento se desenvolva mais rápido a jusante (Figura 33 e 34). O capacete nesta posição afecta consideravelmente a aerodinâmica, aumentando a resistência aerodinâmica.



## **5.4 CONCLUSÕES EM RELAÇÃO AOS MODELOS DE CAPACETES CRIADOS**

Os modelos de capacetes criados permitem ter de alguma forma uma ideia de o quanto a forma do capacete pode reduzir ou aumentar a resistência aerodinâmica. O capacete considerado mais aerodinâmico através dos resultados obtidos foi o capacete 11, embora na posição 3 tenha um valor mais elevado de  $C_d$  em relação ao capacete 10. Os capacetes ensaiados até ao 10º tinham a forma arredondada na parte da frente tendo-se obtido o melhor valor de  $C_d$  para o 9º capacete. A introdução de um perfil bicudo na parte da frente veio diminuir o valor de  $C_d$  (não significativamente) pelo que nos próximos capítulos será feita uma optimização da forma (variando o comprimento da cauda e também a parte da frente), com o objectivo de diminuir a resistência aerodinâmica (neste caso a resistência aerodinâmica de pressão pois é o principal contribuinte para a resistência aerodinâmica) como também fazer com que o ponto de separação da camada limite ocorra mais para jusante.

Nem sempre uma cauda longa favorece a aerodinâmica. É necessário ter em atenção o comprimento da cauda do capacete, pois quando o ciclista mexe a cabeça isso significa que esta pode estar muitas vezes a aumentar a resistência aerodinâmica porque a área frontal aumenta significativamente. Dito isto, a inclinação do capacete é um factor da qual depende a resistência aerodinâmica, pois através das posições simuladas verificou-se que ao variar a posição do capacete a resistência aerodinâmica aumentava.

## 6. ENSAIO COM OUTROS MODELOS DE TURBULÊNCIA E ABORDAGEM DOS MODELOS PARA A CAMADA LIMITE

O modelo *standard k- $\epsilon$*  utiliza funções de parede (*wall functions*) para modelar a camada limite, em vez de ser resolvida. A modelação da camada limite através do *standard wall functions* (funções de parede padrão) não mostra ser a mais adequada pois em torno do capacete verifica-se uma grande variação da pressão (desde pressões positivas à frente e negativas atrás), pois este modelo só é válido para condições de equilíbrio da camada limite. Outro tipo de modelo para modelar a camada limite é o *non-equilibrium wall functions* que consiste na introdução de duas camadas para o cálculo da energia cinética de turbulência nas paredes das células adjacentes, sendo presumido que as células nas paredes vizinhas consistem numa subcamada viscosa e uma camada totalmente turbulenta. Este modelo é o mais indicado em relação ao *standard wall functions* uma vez que tem em conta os gradientes de pressão na modelação da camada limite.

O modelo *realizable k- $\epsilon$*  comparativamente com o *standard k- $\epsilon$* , apresenta uma melhor performance em relação a escoamentos que envolvem rotação, camada limite sujeitas a gradientes de pressão adversos, separação e recirculação. O modelo *realizable k- $\epsilon$*  por assim dizer, é uma melhoria do modelo *standard k- $\epsilon$*  que introduz duas novas formulações relativas à viscosidade de turbulência e à equação de transporte para a taxa de dissipação. Ensaiou-se este modelo com os dois tipos de abordagem da camada limite (*standard wall functions* e *non-equilibrium wall functions*).

O modelo de turbulência *Shear-Stress Transport k- $\omega$*  (SST k- $\omega$ ) não utiliza funções de parede para resolver a zona da camada limite, em vez disso, utiliza baixos números de Reynolds para resolver esta zona (através da opção Low Re corrections existente apenas neste modelo de turbulência), apesar de requerer uma melhor resolução da malha na região da camada limite.

Estes modelos foram ensaiados no FLUENT (Tabela 3) e verifica-se uma discrepância dos valores de  $C_d$  do modelo de turbulência utilizado anteriormente na simulação (*standard k- $\epsilon$* ) em relação ao modelo *realizable k- $\epsilon$*  e SST k- $\omega$  (deram valores semelhantes de  $C_d$ ). De

acordo com um artigo (Defraeye et al., 2010), o modelo SST  $k-\omega$  mostrou ser o melhor modelo a utilizar, sendo uma boa alternativa aos modelos  $k-\epsilon$  que são utilizados na maior parte das simulações sobre desporto. Verifica-se também que o modelo *realizable k- $\epsilon$*  apresentou valores idênticos ao modelo SST  $k-\omega$  pelo que também seria uma opção viável. A escolha do modelo SST  $k-\omega$  foi considerado devido este modelo tratar melhor a zona da camada limite através do uso de baixos números de Re, que por sua vez nos outros modelos a camada limite é tratada através de funções de parede que é menos precisa.

**Tabela 4: Comparação dos modelos de turbulência e modelos da camada limite para o 11° capacete na posição 1.**

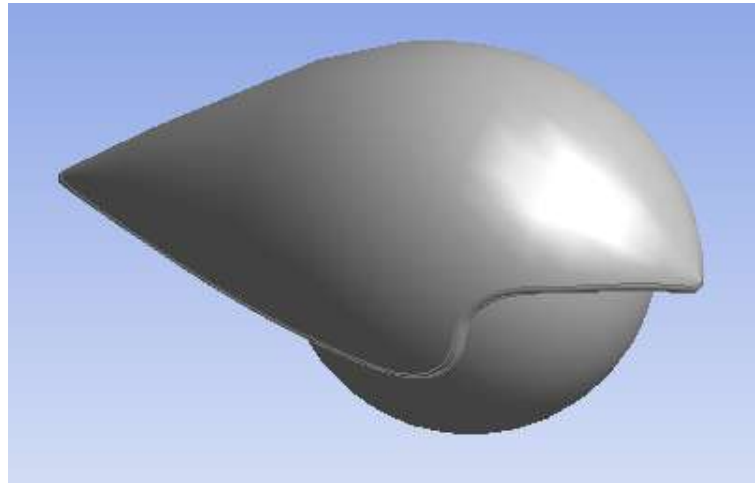
Abreviação	Modelo de turbulência	Abordagem do Modelo da camada limite	Cd
<b>sk-<math>\epsilon</math>_SWF</b>	Standard $k-\epsilon$	Standard wall functions	0,331
<b>sk-<math>\epsilon</math>_NWF</b>	Standard $k-\epsilon$	Non-equilibrium wall functions	0,319
<b>rk-<math>\epsilon</math>_SWF</b>	Realizable $k-\epsilon$	Standard wall functions	0,081
<b>rk-<math>\epsilon</math>_NWF</b>	Realizable $k-\epsilon$	Non-equilibrium wall functions	0,080
<b>sstk-<math>\omega</math></b>	SST $k-\omega$	Low Re corrections	0,081

Para a posição 1 ( $0^\circ$ ) não houve qualquer complicação para a obtenção da convergência com o modelo SST  $k-\omega$ , para um resíduo inferior a 0,001 (a variação do coeficiente de resistência aerodinâmica era mínima, variando só na quarta casa decimal, daí a utilização deste resíduo), o mesmo já não se aplica para as posições 2 ( $30^\circ$ ) e 3 ( $60^\circ$ ), em que a convergência não foi conseguida, tendo-se verificado valores elevados de resíduos para a equação da continuidade, pelo que numa tentativa de obter convergência diminuiu-se os factores de sub-relaxamento do movimento, da energia cinética de turbulência e da taxa de dissipação da energia cinética de turbulência para 0,5 mas não houve qualquer melhoria na convergência, pelo que esta não convergência talvez deve ser devido à qualidade da malha, pois um dos requisitos deste modelo é ter uma boa malha com uma grande resolução e também devido a uma maior recirculação de escoamento nestas posições. O mesmo aconteceu para o modelo *realizable k- $\epsilon$*  para os dois tipos de funções de parede. Com isto, as simulações no FLUENT foram feitas com o modelo *standard k- $\epsilon$* , apesar dos valores obtidos para a posição 1 serem diferentes dos outros modelos (e com certeza para as outras posições), e uma vez que estas simulações não foram validadas em túnel de vento, surge a dúvida dos resultados finais dos valores de Cd, não havendo também um modo de comparação com a bibliografia, pois os estudos realizados foram para o ciclista.

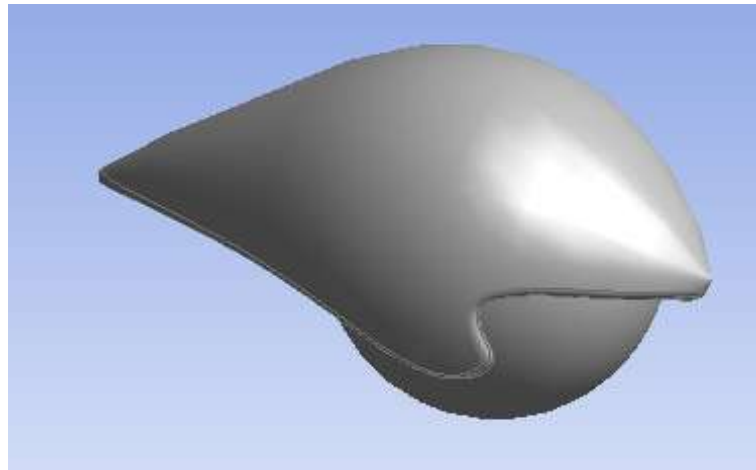
## 7. OPTIMIZAÇÃO DO CAPACETE 11

O capacete 11 foi o capacete mais aerodinâmico pelo que será objecto de estudo neste capítulo. Algumas alterações foram feitas a nível da forma, de modo a compreender a influência no parâmetro do coeficiente de resistência aerodinâmica, a ver se favorece a aerodinâmica.

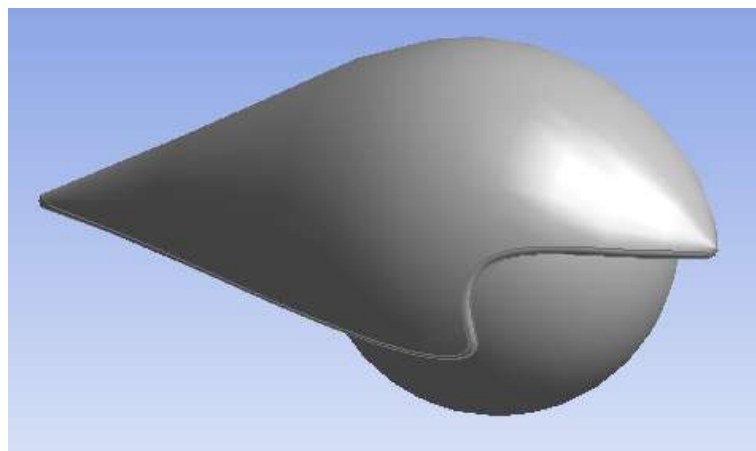
O capacete 11 ensaiado anteriormente apresentava um comprimento total de 41 cm, pelo que foi diminuído este comprimento para 36 cm (Figura 35). Também foi diminuído a área frontal do capacete, uma vez que é um dos factores da qual depende a resistência aerodinâmica. Não foi testado nenhum capacete com um comprimento superior a 41 cm nesta parte, pois como visto anteriormente os capacetes que apresentavam maiores comprimentos geralmente nas posições 2 e 3 o coeficiente de arrasto aumentava significativamente. Por isso variou-se o comprimento abaixo dos 41 cm (Figura 36). A última alteração foi a da Figura 37, em que manteve-se o comprimento em relação ao capacete 11, mas foi alterado a superfície do capacete, sendo menos curva de modo a provocar a separação da camada limite o mais tarde possível e ter a menor perturbação no escoamento a jusante. A área frontal também foi reduzida um pouco em relação ao 11º capacete. Daqui em diante para facilitar a designação de cada capacete optimizado no texto que se segue, foi atribuído uma referência a cada um deles, apresentadas nas legendas das figuras 35, 36 e 37.



**Figura 35: Capacete com 36 cm de comprimento total (11A).**



**Figura 36: Capacete com 38 cm de comprimento total (11B).**



**Figura 37: Último capacete simulado com 41 cm de comprimento (11C).**

## 7.1 ANÁLISE DOS RESULTADOS

Para a simulação no FLUENT as condições de fronteira foram idênticas às do subcapítulo 4.4.2, tendo sido utilizado o mesmo modelo de turbulência *standard k- $\epsilon$*  pois foi o único que obtinha convergência nas três posições simuladas. Quanto ao tipo de modelagem da camada limite foi escolhido o *non-equilibrium wall functions* em vez de o *standard wall functions*.

Na Tabela 4 estão apresentados os valores da força e coeficiente de resistência aerodinâmica das otimizações feitas relativas ao capacete 11.

**Tabela 5: Valores obtidos Cd e D das otimizações feitas no capacete 11.**

	11º Capacete			11A			11B			11C		
Posição	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Ap (m)	0,032	0,036	0,046	0,029	0,031	0,039	0,031	0,034	0,042	0,029	0,033	0,041
Cd	0,32	0,38	0,52	0,33	0,41	0,48	0,35	0,44	0,49	0,32	0,39	0,49
D (N)	1,21	1,62	2,84	1,14	1,51	2,24	1,27	1,77	2,47	1,10	1,52	2,38

O capacete 11B mostrou ser o menos aerodinâmico para qualquer das posições simuladas. O capacete mais curto foi o 11A, como já era de esperar apresenta um menor coeficiente de resistência aerodinâmica para a posição 3, sendo que uma das principais influências foi a menor área frontal que este modelo apresenta, comparativamente aos outros modelos. Na posição 1 o encurtamento da cauda do capacete não favorece a diminuição da resistência aerodinâmica sobre o mesmo, como foi possível observar com os modelos 11A e 11B que apresentavam 36 cm e 38 cm de comprimento total respectivamente. O aumento do comprimento da cauda permite que o capacete tenha uma superfície menos encurvada, permitindo assim que o escoamento tenha um comportamento contínuo e pouco perturbado, sem existência de quaisquer vórtices (isto para a posição 1), embora nas outras posições seja prejudicado um pouco, pois apresenta uma maior área frontal projectada, como por exemplo comparando o modelo 11A e 11C, a área frontal é um pouco menor nas posições 2 e 3 para o capacete 11A como está indicado Tabela 4. De reparar que para qualquer dos modelos criados obteve-se uma redução da força de resistência aerodinâmica em quase todas as posições comparativamente ao capacete 11 (Figura 39), devido à diminuição da área frontal em cada posição dos capacetes 11A, 11B e 11C em relação ao capacete 11.

O capacete que mostra ser mais aerodinâmico foi o 11C, comparativamente ao capacete 11 e aos outros modelos, apresenta valores baixos de coeficiente de resistência aerodinâmica em qualquer posição, como é possível ver na Tabela 4. Seguidamente o estudo foi centrado neste capacete, analisando o escoamento em torno deste, encontrando-se em anexo A e B as visualizações do campo de escoamento dos capacetes 11A e 11B, respectivamente.

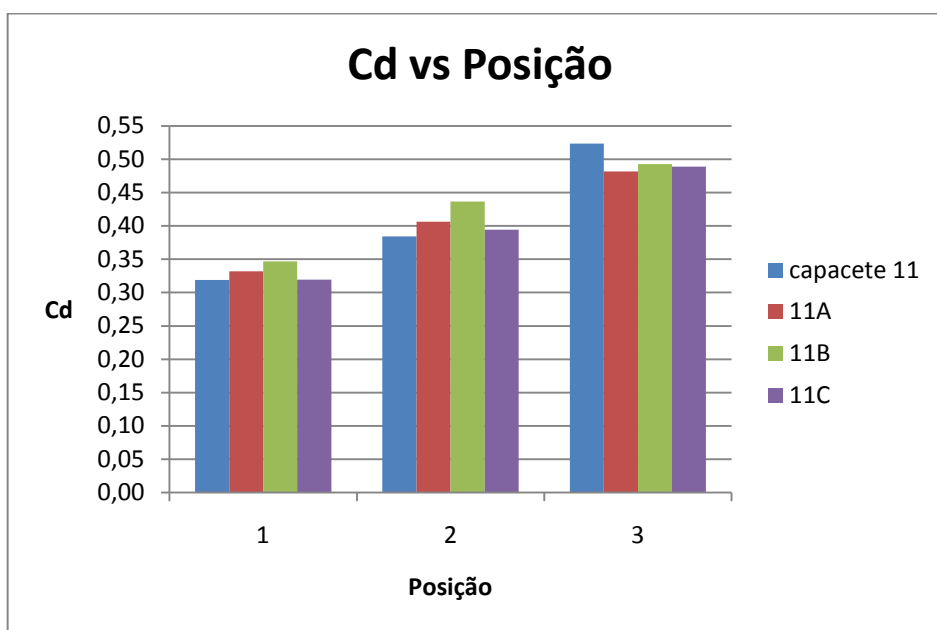


Figura 38: Valores de coeficiente de resistência aerodinâmica em função da posição.

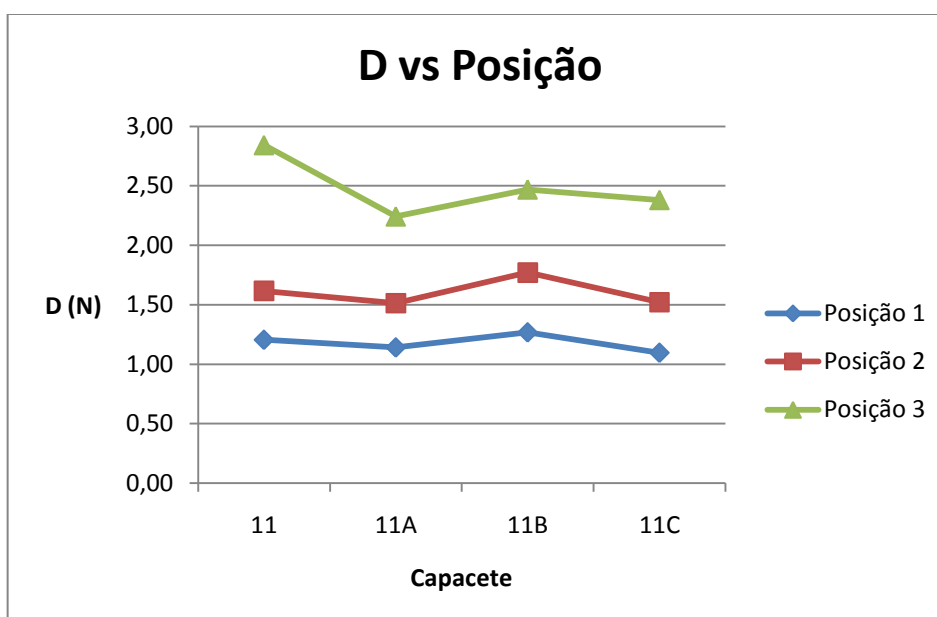
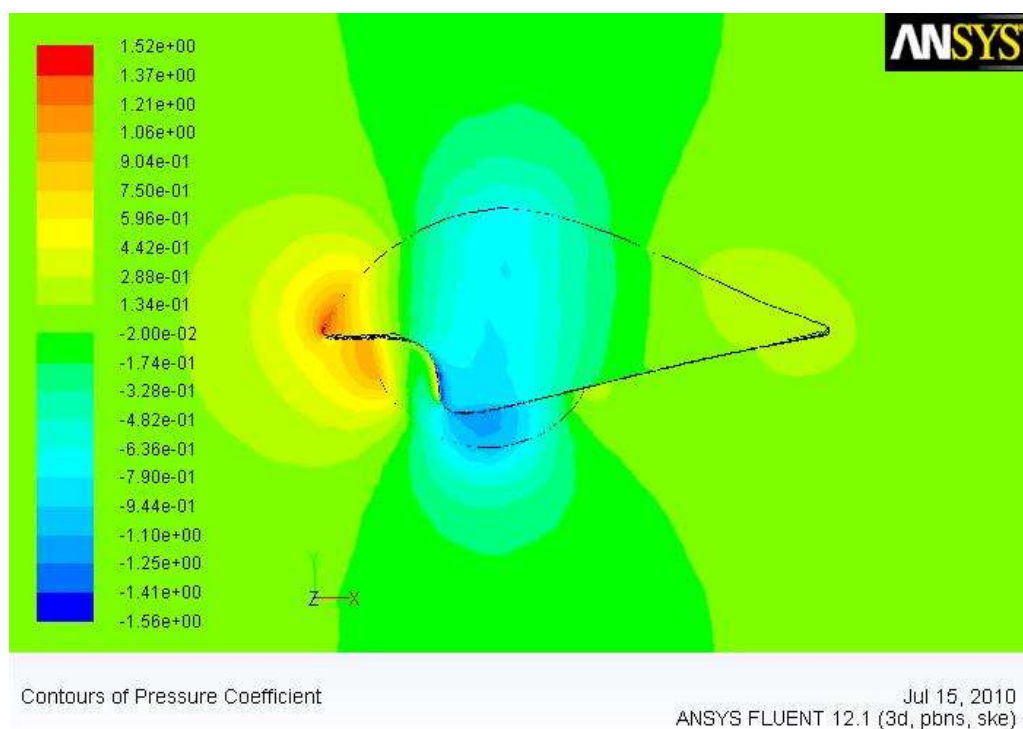


Figura 39: Influência da posição do capacete na força de resistência aerodinâmica.

Através dos gráficos anteriores, foi possível observar mais uma vez que a mudança da posição da cabeça/capacete teve influência na resistência aerodinâmica, aumentando gradualmente desde a posição 1 até à 3, sendo que nesta posição verifica-se valores mais elevados de coeficiente de resistência aerodinâmica. Foi colocado o capacete 11, de modo a comparar os valores de Cd, Ap e D com as alterações feitas nos outros modelos.

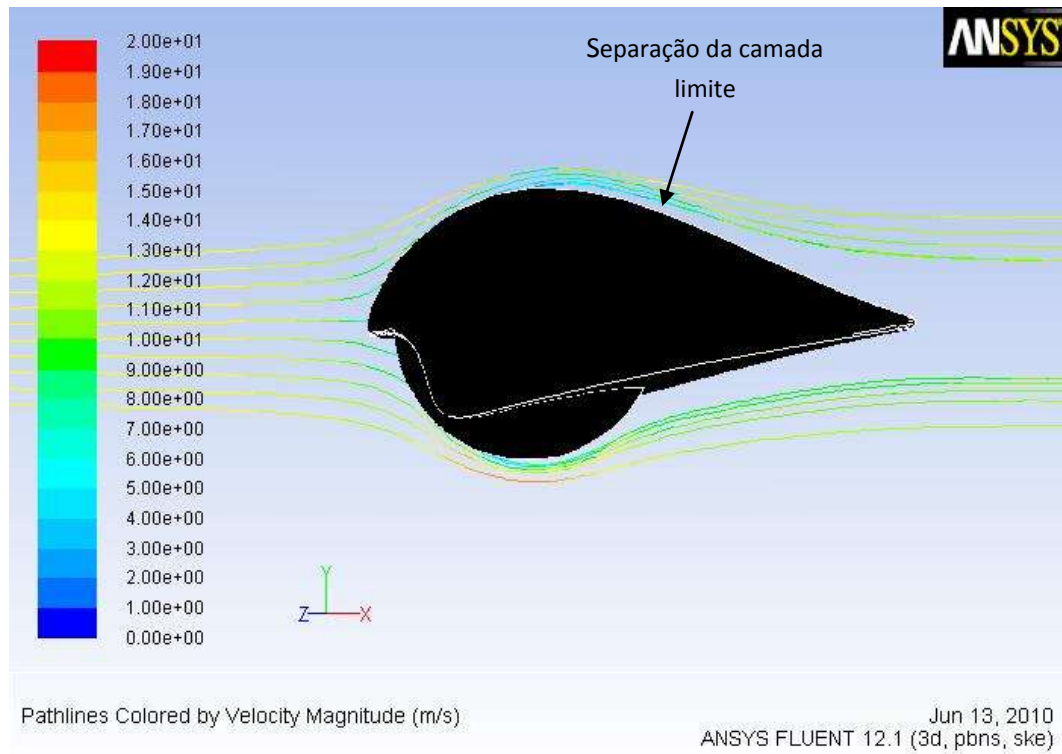


**Figura 40: Contornos de coeficiente de pressão para o capacete 11C.**

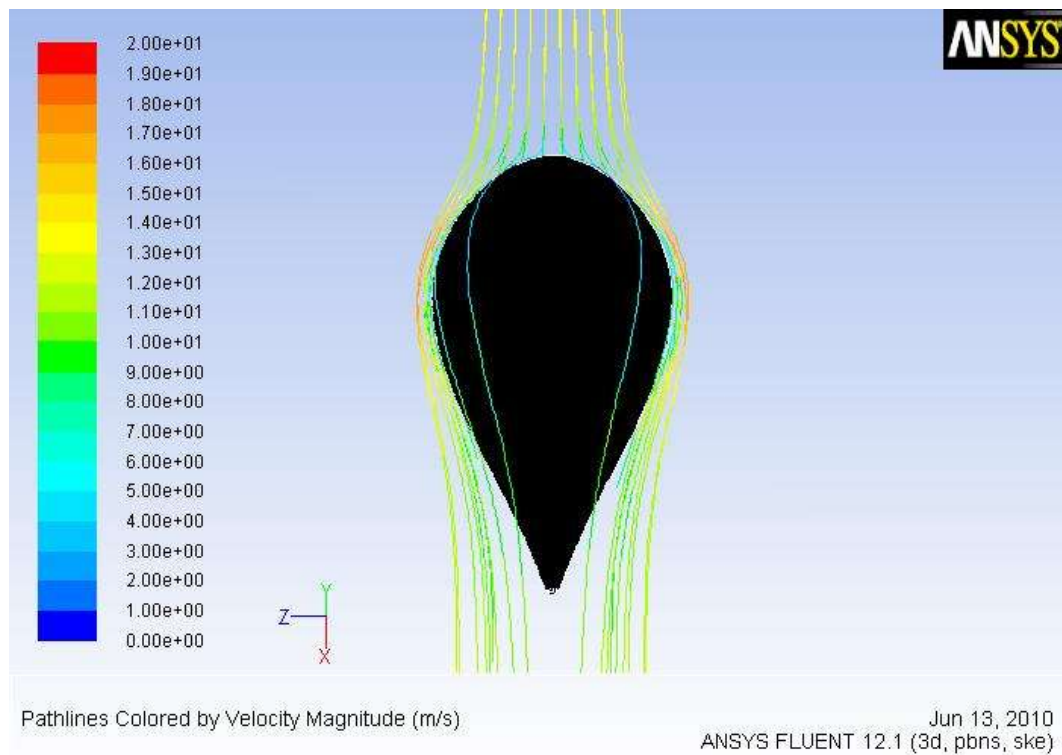
Para o capacete 11C na posição 1, pode-se observar que a resistência aerodinâmica é devido à diferença de pressão entre a frente e atrás do capacete (Figura 40), uma vez mais o atrito viscoso na superfície tem uma baixa contribuição. O FLUENT apresenta o coeficiente de atrito viscoso, tendo um valor máximo de 0,05, e dividindo pelo coeficiente de resistência aerodinâmica obtêm-se um valor de contribuição viscosa aproximadamente de 16%. A jusante parte da pressão é recuperada.

Na Figura 41 e 42 é possível observar as linhas de corrente do escoamento, que permite ter uma visualização do campo de escoamento em torno do capacete. Nesta posição apresenta um escoamento bem comportado. O escoamento separa-se da superfície na parte da cauda do capacete, devido ao gradiente de pressão (baixos na parte de trás) originado na superfície, o que pode originar zonas de recirculação de fluido. Para objectos com superfície curva e com elevados valores de número de Reynolds, como é no caso em estudo ( $Re \approx 4 \times 10^5$ ) a espessura da camada limite é fina sendo insignificante a perturbação do escoamento externo à camada. Para este capacete o escoamento permanece mais tempo na superfície do capacete, o que origina um separação mais tardia da camada limite.





**Figura 41: Linhas de corrente do escoamento em torno do capacete 11C.**



**Figura 42: Vista de cima das linhas de corrente do escoamento do capacete 11C.**

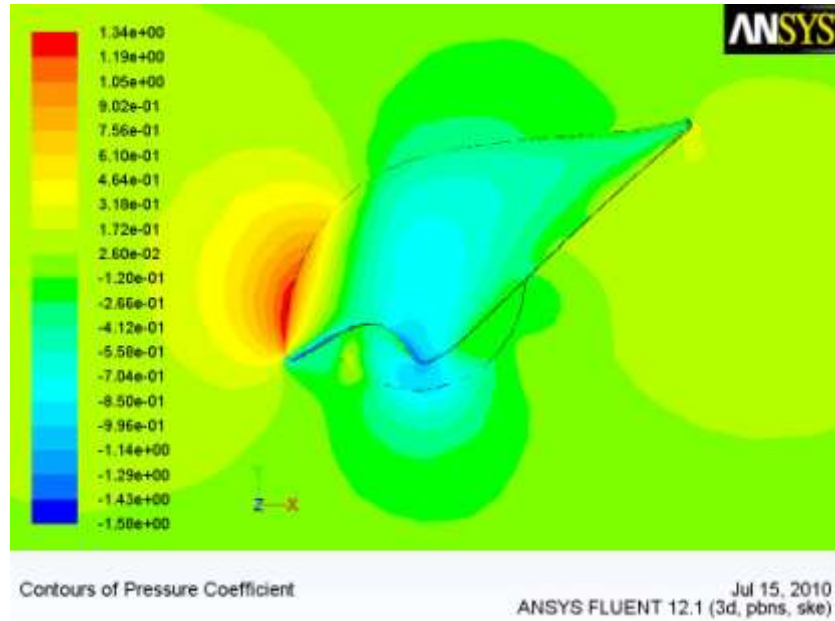


Figura 43: Contornos de coeficiente de pressão do capacete 11C na posição 2.

Na posição 2 ( $30^\circ$ ), verifica-se o mesmo que na posição 1, elevadas pressões à frente e baixas pressões atrás, sendo o principal contribuinte para o aumento da resistência aerodinâmica, como ilustra a figura seguinte.

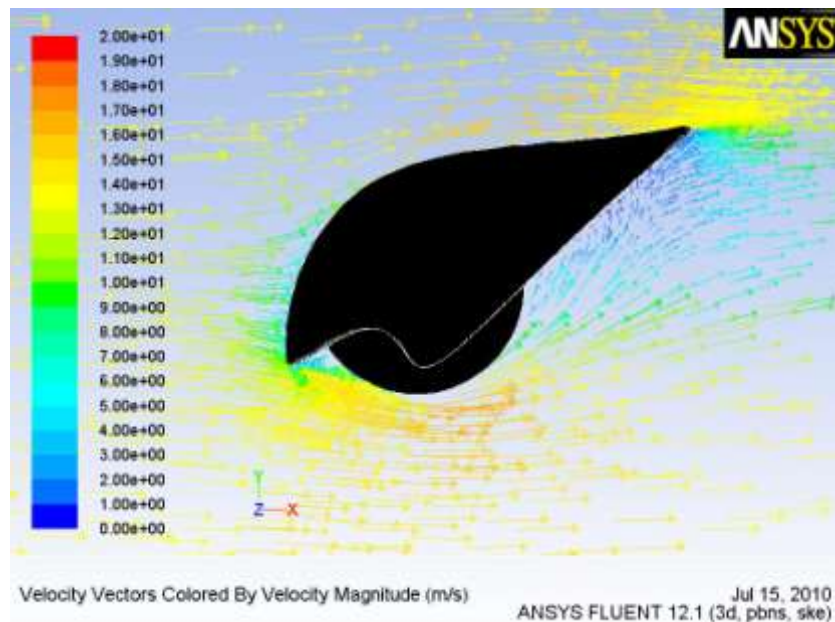


Figura 44: Vectores de velocidade.

Através de um plano criado no centro do domínio de integração, os vectores de velocidade apresentam um comportamento aleatório na região da esteira, havendo recirculação de escoamento na zona da cauda (Figura 44).

As linhas de escoamento demonstram a formação de alguns vórtices na região da esteira (Figura 45), sendo esta um pouco maior e mais turbulenta em relação à esteira do capacete na posição 1. A separação do escoamento ocorre nas arestas do capacete.

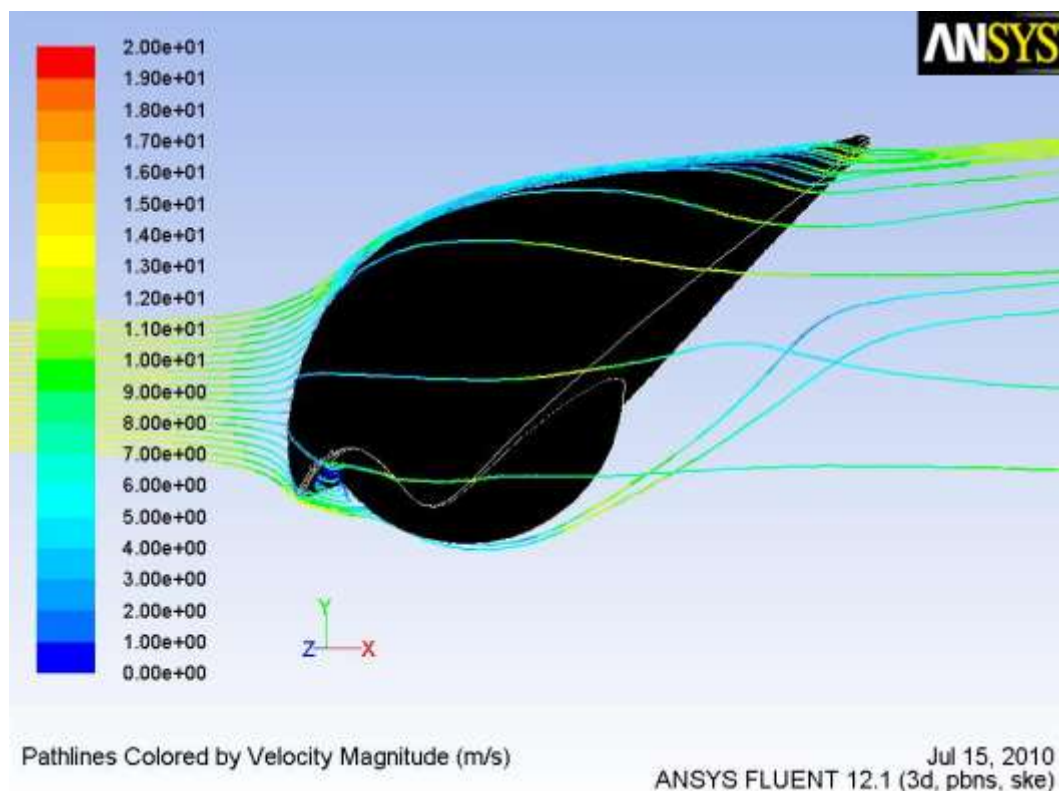


Figura 45: Linhas de corrente do escoamento no capacete 11C.

Na posição 3, a resistência aerodinâmica devido à pressão é mais evidente nesta posição (Figura 46), confirmando-se com um elevado valor de coeficiente de resistência aerodinâmica (0,49). Apesar da resistência aerodinâmica devido ao atrito viscoso ter aumentado em relação à posição 1 (apresenta um valor de coeficiente de resistência aerodinâmica devido ao atrito viscoso de 0,06), a resistência aerodinâmica devido à pressão é dominante.

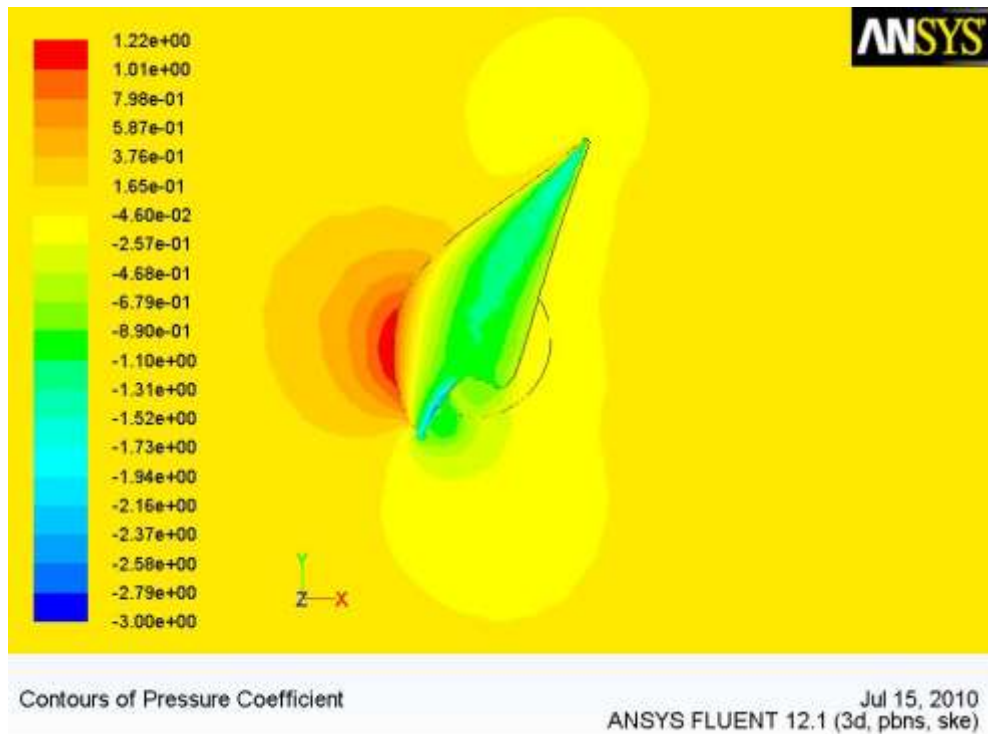


Figura 46: Contornos de coeficiente de pressão no capacete 11C para a posição 3.

As linhas de corrente do escoamento permitem observar o campo de escoamento em torno do capacete, na qual visualiza-se um escoamento perturbado, com formação de vórtices na região da esteira.

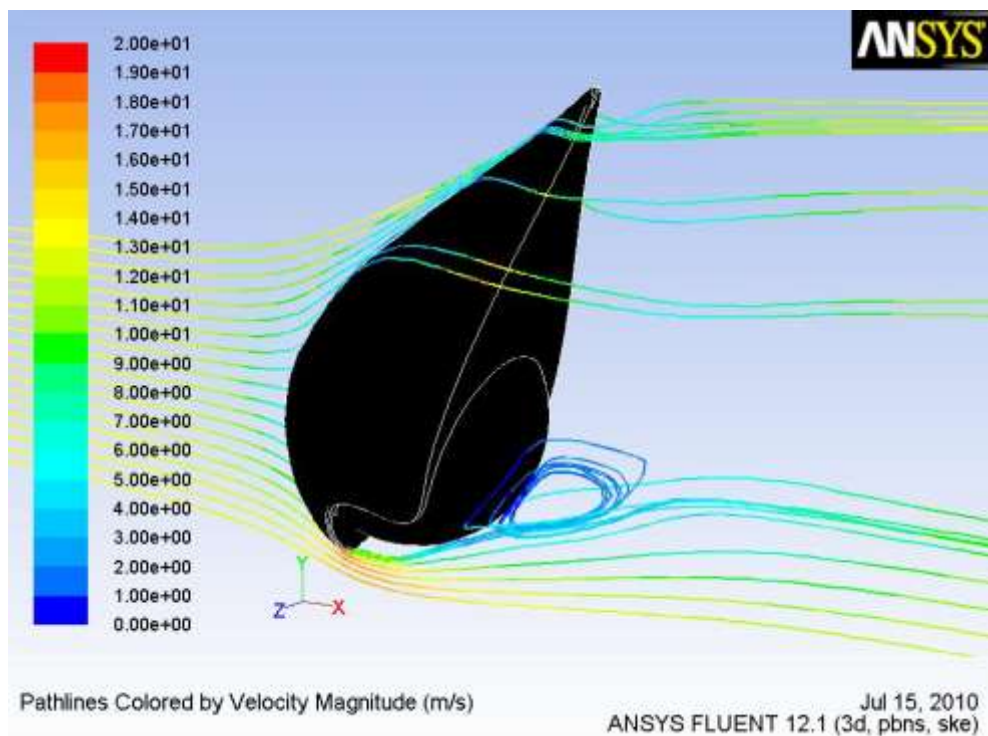


Figura 47: Linhas de corrente do escoamento colocadas na vertical.

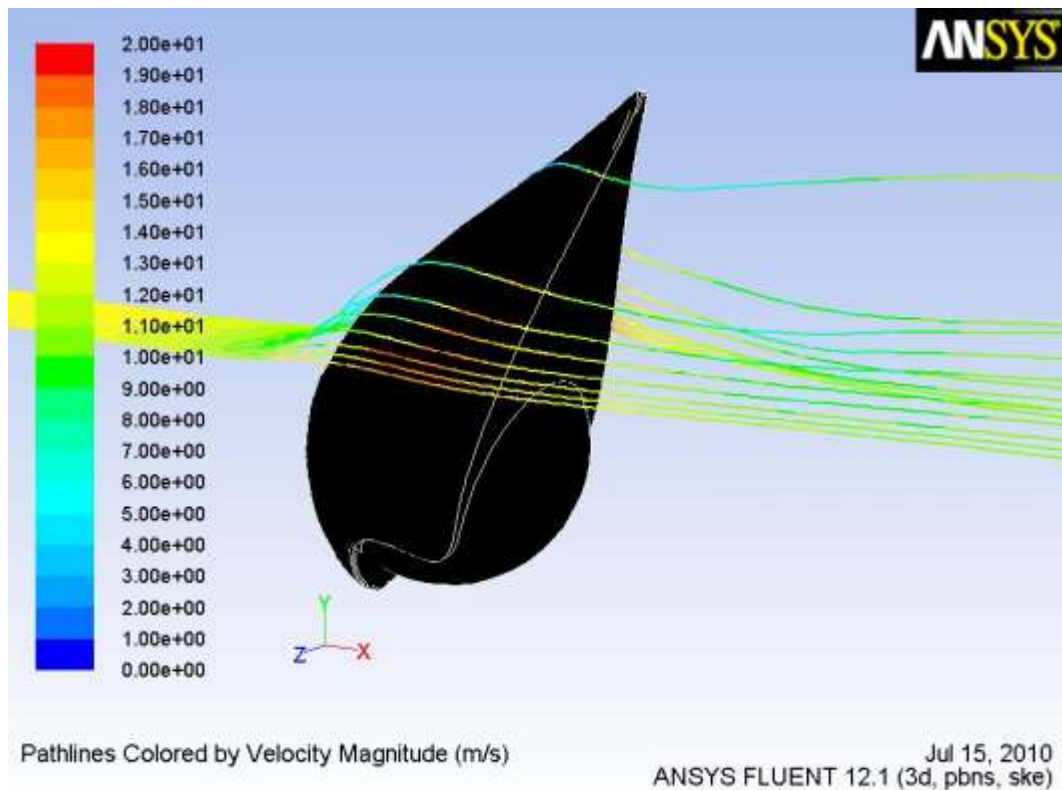


Figura 48: Linhas de corrente do escoamento na horizontal.

## 7.2 INFLUÊNCIA DE REYNOLDS PARA ESCOAMENTOS TURBULENTOS

Este gráfico foi obtido através de várias simulações no FLUENT em que foram impostas para cada simulação a velocidade do escoamento na entrada igual a 10, 13,9, 18, 22, 26 e 30  $\text{m.s}^{-1}$ , na qual obteve-se um valor de  $C_d$  para cada velocidade.



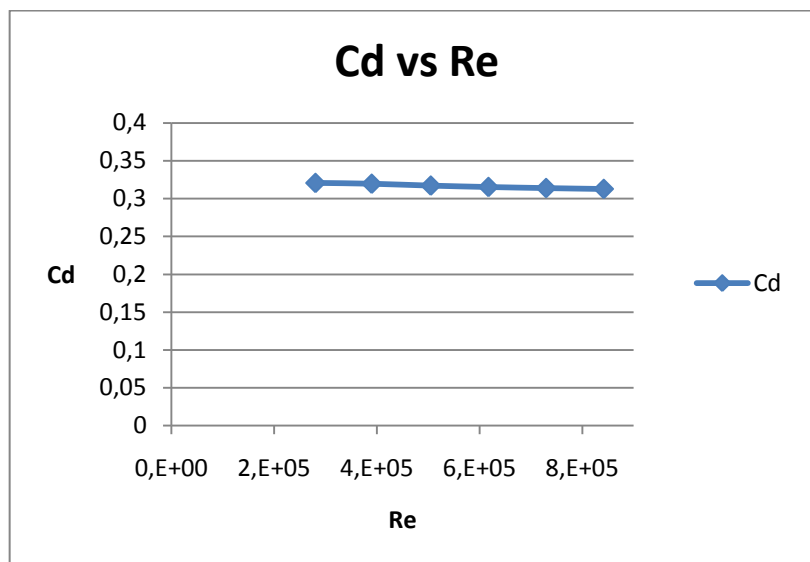


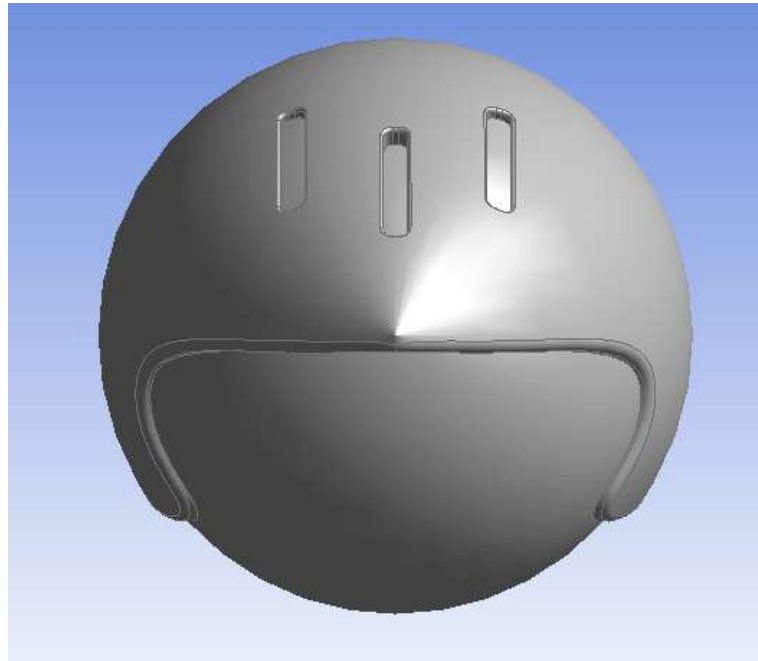
Figura 49: Coeficiente de resistência aerodinâmica em função de elevados números de Re.

No gráfico anterior pode-se observar que o coeficiente de resistência aerodinâmica é praticamente independente do número de Reynolds, isto para elevados números de Reynolds (escoamento turbulento). Esta independência é devido ao facto dos efeitos de inércia serem dominantes em relação aos efeitos viscosos como foi demonstrado anteriormente. Através da fórmula do coeficiente de pressão ( $C_p = (p_{sup} - p_0)/(\rho U^2/2)$ ), a diferença de pressão (que corresponde à pressão estática) ( $p_{sup} - p_0$ ) varia proporcionalmente com a pressão dinâmica ( $\rho U^2/2$ ), fazendo com que o  $C_p$  seja independente de Re e consequentemente do coeficiente de resistência aerodinâmica.

### 7.3 INFLUÊNCIA DAS ABERTURAS NO CAPACETE 11C

Estes capacetes usados nas provas de contra-relógio apresentam aberturas de ventilação para arrefecer a cabeça (apesar de serem poucas), uma vez que pode tornar-se incomodativo para alguns ciclistas as elevadas temperaturas que se geram-se na cabeça. Alguns ciclistas preferem usar capacetes sem aberturas, de modo a favorecer a aerodinâmica com o objectivo de poupar alguns segundos no final da prova. Estes capacetes são pouco ventilados pois o tempo de prova neste tipo de corridas de contra-relógio é pequeno, pelo que a aerodinâmica tem um papel importante.

Foram colocadas 3 aberturas de ventilação na parte da frente do capacete 11C com as dimensões 8x50 mm, sob a forma rectangular (ilustrado na Figura 50).



**Figura 50: Capacete 11C com 3 aberturas de ventilação.**

Realizou-se o estudo para ver se a inclusão de aberturas no capacete prejudicava a aerodinâmica, através da simulação no FLUENT obteve-se um valor de coeficiente de resistência aerodinâmica de 0,33, enquanto o capacete sem aberturas tinha um valor de 0,32 não influenciando significativamente o valor de  $C_d$ . As aberturas de ventilação provocam de certa forma alguma perturbação no escoamento, como foi possível visualizar nas figuras seguintes.

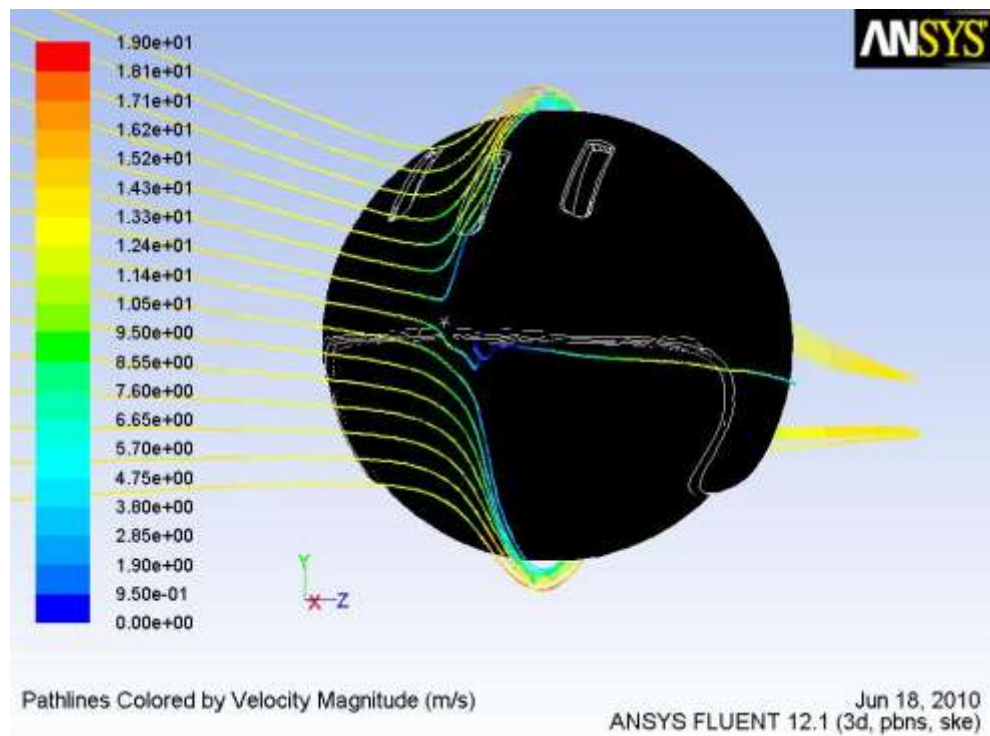


Figura 51: Linhas de corrente do escoamento na vertical.

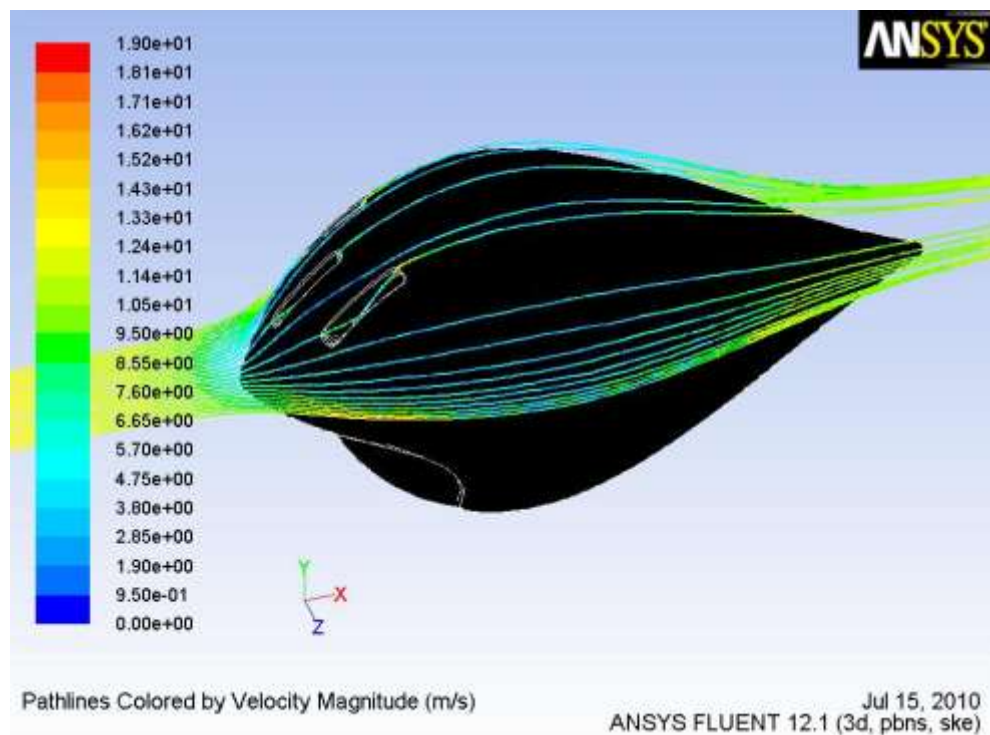


Figura 52: Vista de cima das Linhas de corrente do escoamento.



É necessário ter em atenção ao número de aberturas de ventilação, uma vez que em demasia pode prejudicar a aerodinâmica do capacete. As aberturas criadas não teve influência na área frontal e para este caso a aerodinâmica não foi significativamente afectada.

## **7.4 REDUÇÃO DA RESISTÊNCIA AERODINÂMICA E POTÊNCIA POUPADA**

Os capacetes aerodinâmicos permitem reduzir a resistência aerodinâmica, quando comparados com um capacete normal de ciclismo, o que corresponde a uma poupança de energia por parte do ciclista (o ciclista necessita de menos energia para vencer a resistência aerodinâmica). Para quantificar essa redução de resistência aerodinâmica e poupança de energia foi necessário considerar um pressuposto, em que num percurso de 40 km estimou-se que um ciclista profissional tem cerca de 22 N de resistência aerodinâmica e uma potência média de saída de 450 Watts (Sidelko, 2007).

A percentagem de redução da resistência aerodinâmica é dada pela seguinte equação:

$$\frac{\text{Resist. aero. do capacete normal} - \text{Resist. aero. do capacete aerodinâmico}}{\text{Resistência aerodinâmica total}} \times 100$$

Onde a resistência aerodinâmica total é o valor de resistência aerodinâmica do ciclista com todo o equipamento associado (22 N).

A quantidade de potência poupada é determinada multiplicando a percentagem de resistência aerodinâmica pela potência de saída do ciclista (P) (450 Watts). A equação seguinte mostra a potência poupada:

$$\text{Potência poupada} = \% \text{ Redução Resist. aerodinâmica} \times P$$

### **7.4.1 COMPARAÇÃO ENTRE UM CAPACETE NORMAL SEM ABERTURAS DE VENTILAÇÃO E OS CAPACETES AERODINÂMICOS**

Para fazer esta comparação foi criado um capacete normal sem aberturas (Anexo C, Figura 76), com o objectivo de quantificar o benefício da existência de uma cauda no capacete em termos de redução de resistência aerodinâmica e de energia poupada. As simulações foram realizadas para a posição 1. O capacete normal sem aberturas apresentou um valor de coeficiente de resistência aerodinâmica igual a 0,40 e um valor resistência aerodinâmica de 1,5 N. Na tabela 5 encontra-se os valores de resistência aerodinâmica para os capacetes aerodinâmicos e o capacete normal.

**Tabela 6: Valores resistência aerodinâmica.**

Capacete	Capacete normal sem aberturas	11	11A	11B	11C
<b>D (N)</b>	1,5	1,2	1,1	1,3	1,1

Na tabela seguinte encontra-se apresentado os valores de redução da resistência aerodinâmica e da potência poupada das optimizações efectuadas no capacete 11 e o capacete 11C.

**Tabela 7: Redução da resistência aerodinâmica e potência poupada.**

Capacete	11	11A	11B	11C
<b>Redução da resistência aerodinâmica (%)</b>	1,2	1,5	0,9	1,7
<b>Potência poupada (Watts)</b>	5,2	6,5	4,0	7,4

Para qualquer dos modelos aerodinâmicos ensaiados verifica-se que a cauda apresenta benefícios em relação ao capacete normal. O capacete 11C considerado o mais aerodinâmico foi o que apresentou uma maior redução da resistência aerodinâmica (1,7%) e de potência poupada (7,4 Watts). O capacete 11B para a posição 1 foi o menos aerodinâmico uma vez que apresenta valores mais baixos de redução da resistência aerodinâmica e de potência poupada (pois apresentou um  $C_d$  maior).

#### 7.4.2 COMPARAÇÃO ENTRE UM CAPACETE NORMAL SEM E COM ABERTURAS DE VENTILAÇÃO

No capacete normal foram colocados 6 aberturas de ventilação com as dimensões 15x60 mm (Anexo C, Figura 77). Grande parte dos capacetes normais apresenta um número elevado de aberturas de ventilação com o objectivo de arrefecer a cabeça, pois torna-se incomodativo para o ciclista as elevadas temperaturas que podem gerar-se na cabeça. Estes capacetes com aberturas apresentam valores elevados de coeficiente de resistência aerodinâmica, como foi possível constatar com o capacete criado, na qual apresentou um valor de  $C_d$  igual a 0,49 (para a posição 1) e uma resistência aerodinâmica de 1,75 N (superior ao capacete normal sem aberturas e aos capacetes aerodinâmicos).

**Tabela 8: Redução da resistência aerodinâmica e potência poupada.**

	Capacete normal sem aberturas
<b>Redução da resistência aerodinâmica (%)</b>	1,3
<b>Potência poupada (Watts)</b>	6,0

Foi comparado a influência que as aberturas podem ter no capacete normal sem aberturas e verificou-se que as aberturas prejudicam a aerodinâmica nos capacetes normais. A

ausência de aberturas permite uma redução da resistência aerodinâmica de 1,3% e uma potência poupada de 6 Watts.

Contrariamente ao que foi dito no subcapítulo 7.2, um elevado número de aberturas tem influência na área frontal, pois verificou-se que para o capacete normal com aberturas a área frontal é um pouco menor em relação ao sem aberturas.

### 7.4.3 COMPARAÇÃO ENTRE UM CAPACETE NORMAL COM ABERTURAS DE VENTILAÇÃO E OS CAPACETES AERODINÂMICOS

Com esta comparação pretende-se calcular através do pressuposto considerado, o quanto um capacete aerodinâmico pode beneficiar um ciclista profissional. A tabela seguinte mostra a percentagem de redução da resistência aerodinâmica e potência poupada através da troca de um capacete normal para um aerodinâmico.

**Tabela 9: Redução da resistência aerodinâmica e potência poupada com o uso de um capacete aerodinâmico.**

Capacete	11	11A	11B	11C
<b>Redução da resistência aerodinâmica (%)</b>	2,5	2,8	2,2	3,0
<b>Potência poupada (Watts)</b>	11,2	12,5	10,0	13,4

Qualquer um dos capacetes aerodinâmicos apresenta benefícios em relação ao capacete normal com aberturas. O capacete mais aerodinâmico (11C) apresenta uma redução de resistência aerodinâmica de 3% em comparação ao capacete normal e uma economia de energia de 13,4 Watts.

De modo a ter uma ideia de quanto os ciclistas podem poupar alguns segundos no cronómetro no fim de uma prova de contra-relógio, comparou-se um ciclista que mantém a postura e usa um capacete aerodinâmico (11C) em relação a outro ciclista que tem a tendência de variar a postura e apresenta um capacete menos aerodinâmico (11B). Baseando-se no pressuposto anterior, que num percurso de 40 km o ciclista gasta em média 450 Watts, calculou-se a velocidade média do ciclista através da equação seguinte:

$$u_c = \left( \frac{P}{0,5CdA_p\rho} \right)^{1/3}$$

De acordo com o artigo de Gibertini et al. (2008), o conjunto ciclista com bicicleta apresenta um valor de área de resistência aerodinâmica ( $CdA_p$ ) de  $0,223 \text{ m}^2$ , resultado obtido

em túnel de vento. Para este caso considerou-se a área frontal de  $1 \text{ m}^2$ , uma vez que pretende-se quantificar em termos de tempo, a influência na variação do parâmetro  $C_d$ . Utilizando a expressão anterior calculou-se a velocidade do ciclista que mantém a postura, sendo de  $15 \text{ m/s}$  ( $54 \text{ km/h}$ ), que numa distância de  $40 \text{ km}$  corresponde a um tempo de  $2688 \text{ s}$  ( $\sim 44 \text{ min e } 48 \text{ seg}$ ). Para uma variação de  $C_d$  igual a  $0,03$  ( $0,32 < C_d < 0,35$ ), somando este valor à área de resistência obtém-se um valor de  $0,253 \text{ m}^2$  (ciclista que varia a postura) e aplicando a equação anterior obtém-se uma velocidade de  $14 \text{ m/s}$  ( $51 \text{ km/h}$ ). No mesmo percurso considerado o tempo gasto foi de  $2804 \text{ s}$  ( $\sim 46 \text{ min e } 42 \text{ seg}$ ). Através da diferença dos dois tempos calculados anteriormente, o ciclista pode poupar  $116 \text{ s}$ . Este valor pode parecer elevado pois o percurso é considerado em linha recta e com uma velocidade constante, o que não corresponde à realidade, mas permite-nos ter uma ideia de que a alteração da postura do ciclista, como também a utilização de capacetes mais ou menos aerodinâmicos pode influenciar em termos de tempo, beneficiando ou prejudicando a performance do ciclista.

As aberturas de ventilação provocam um escoamento aleatório em torno do capacete normal, originando uma recirculação de fluido no interior das aberturas. O escoamento a jusante apresenta uma maior turbulência com formação de vórtices (esteira maior), quando comparado com os capacetes aerodinâmicos (Figura 53 e anexo D).

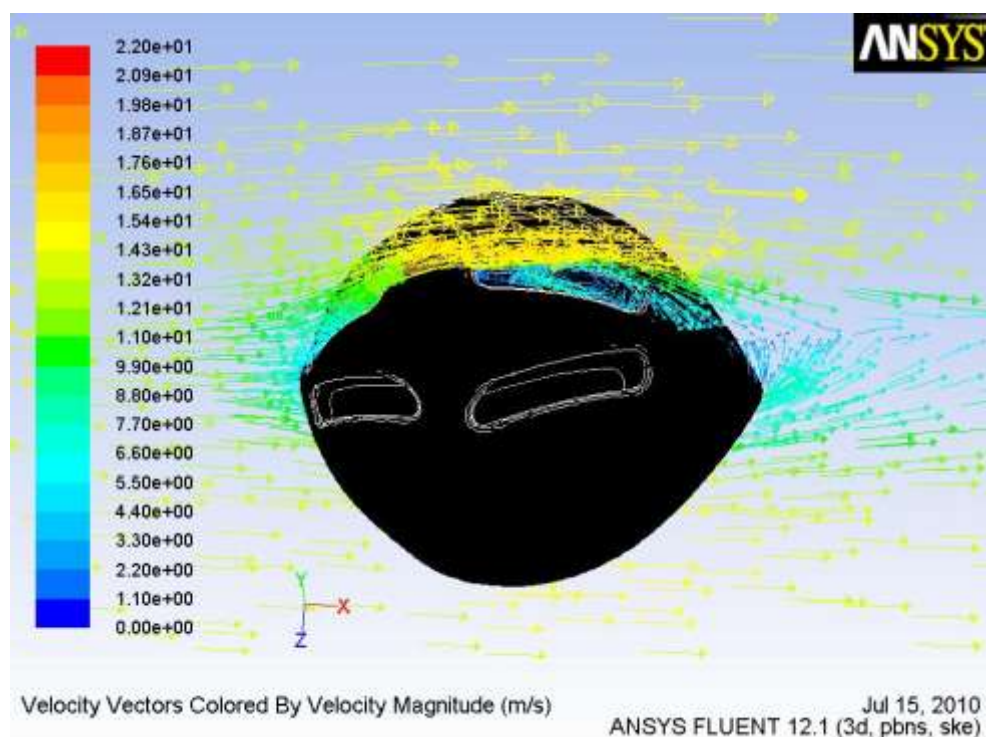


Figura 53: Vista de cima do capacete normal dos vectores de velocidade.

## **8. CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS DE TRABALHO FUTURO**

O estudo teve como objectivo simular o escoamento em torno de um capacete de ciclismo de competição em 3 posições diferentes, uma vez que o ciclista não mantém a cabeça sempre na mesma posição ao longo da prova devido a diversos factores, como por exemplo o cansaço ou a existência de subidas durante o percurso, fazendo com que este baixe a cabeça devido ao esforço exigido. Para isso foi criada várias formas de capacetes e verificou-se que a forma do capacete influencia a resistência aerodinâmica, na qual algumas formas mostraram ser menos aerodinâmicas (como exemplo o capacete 1, 2 e 3) em relação a outros que eram mais aerodinâmicos (7, 9 e 11).

Os resultados da simulação computacional permite-nos concluir o seguinte:

- 1) A variação da inclinação do capacete para as posições 2 e 3, prejudica a performance do ciclista, uma vez que aumenta a resistência do ar que actua no capacete porque a área frontal projectada aumenta nestas posições, mesmo para os capacetes mais pequenos (como exemplo o 2, 6 e 10), e através das imagens retiradas do FLUENT pode-se observar a formação de uma esteira maior e com a existência de vórtices.

- 2) A resistência aerodinâmica originada ao longo do capacete é devido à pressão na qual formou-se altas pressões à frente e baixas pressões atrás do capacete, concluindo assim e comprovando com a literatura existente que para objectos aerodinâmicos a principal fonte de resistência aerodinâmica é devido à diferença de pressão e a contribuição devido aos efeitos viscosos na superfície é baixa.
- 3) A forma do capacete mais aerodinâmica foi a do capacete 11, que tem a característica de apresentar um perfil em bico na parte da frente e uma cauda com um comprimento de cerca de 22 cm. Este capacete apresentou valores mais baixos nas 3 posições, excepto na posição 3 (o capacete 10 teve um menor valor de coeficiente de resistência aerodinâmica). Seguidamente este capacete foi optimizado, tendo-se diminuído a área frontal nas 3 posições e o modelo 11C foi o que teve valores mais baixos de resistência aerodinâmica, com excepção na posição 3, o capacete 11A correspondente ao capacete mais pequeno teve um valor mais baixo.
- 4) Com esta análise, pode-se concluir que os ciclistas que apresentam boas condições físicas e são capazes de manter a posição de contra-relógio durante a prova, incluindo a posição da cabeça na posição 1, recomenda-se a utilização de um capacete com cauda maior, com as características semelhantes ao capacete 11C, pois favorece a aerodinâmica nesta posição. Pelo contrário, se o ciclista tem a tendência de baixar demasiadas vezes a cabeça durante a prova devido ao cansaço ou devido ao hábito, é aconselhável utilizar um capacete mais pequeno (com cauda pequena), pois a resistência aerodinâmica é menor devido à área frontal projectada ser menor, embora não favoreça a primeira posição. Com isto cabe ao critério de cada ciclista de acordo com as suas capacidades físicas em manter durante um período de tempo a postura ideal, escolher o capacete mais adequado.
- 5) Este estudo quantificou os benefícios da utilização de um capacete aerodinâmico em relação a um capacete normal. Através do uso de um capacete aerodinâmico, um ciclista profissional pode poupar alguma energia e reduzir a resistência aerodinâmica global.
- 6) A introdução de poucas aberturas no capacete aerodinâmico provocou uma alteração no valor de coeficiente de resistência de 0,32 para 0,33, sendo pouco significativo a introdução de poucas aberturas. O mesmo não acontece para os capacetes normais, a necessidade de arrefecer a cabeça faz com que seja necessário um número elevado de aberturas de ventilação, uma vez que estes capacetes são utilizados durante maiores períodos de tempo, quando comparados com os capacetes aerodinâmicos usados nas provas de contra-relógio. O elevado número de aberturas não favorece a aerodinâmica, tendo o coeficiente de resistência aumentado de 0,40 (para o capacete normal sem aberturas) para 0,49 (correspondente ao capacete normal com aberturas).
- 7) Neste estudo o ciclista pode poupar 116 segundos com a utilização do capacete mais aerodinâmico (11C) em prol de um menos aerodinâmico (11B), mantendo a posição de contra-relógio durante o percurso, considerando o percurso de 40 km em linha recta e com uma velocidade constante.

Neste estudo foram consideradas algumas simplificações, como por exemplo o capacete foi simulado como um corpo liso, as dimensões do capacete não foram rigorosas, mas também pelo que parece estes capacetes têm uma margem de liberdade no que concerne às formas e dimensões, uma vez que os vários fabricantes deste tipo de capacetes apresentam variadas formas e tamanhos, não deixando de ter em atenção o factor da segurança (para isso são realizados testes de impacto). A esfera colocada no capacete teve influência no valor final de coeficiente de resistência aerodinâmica.

Como sugestões para trabalhos futuros, fazer a simulação para o modelo *Shear-Stress Transport  $k-\omega$*  para as posições 2 e 3, pois nestas posições verificou-se uma recirculação de fluído na esteira vindo a dificultar o processo de convergência. A malha utilizada também pode ser objecto de estudo para melhorar os resultados obtidos. Também seria interessante simular o ciclista para diferentes posturas do corpo e comparar com a bibliografia existente.

## REFERÊNCIAS

ANSYS Worbench 12.1 User's Guide.

ANSYS FLUENT 12.1 User's Guide.

Brühwiler, P.A., Buyan, M., Huber, R., Bogerd, C. P., Rösger, T., 2006. Heat transfer variations of bicycle helmets. *Journal of sports sciences*, 24(0): 1 – 13.

Chabroux, V., Barelle, C., Favier, D., 2009. Aerodynamics of Time Trial Bicycle Helmets. *The engineering of sports 7 vol.2*: 401-410.

Defraeye, T., Blocken, B., Koninckx, E., Hespel, P., Carmeliet, J., 2010. Aerodynamic study of different cyclist positions: CFD analysis and fullscale wind-tunnel tests. *Journal of Biomechanics*. 43 (7), 1262-1268.

Defraeye, T., Blocken, B., Koninckx, E., Hespel, P., Carmeliet, J., 2010. Computational fluid dynamics analysis of cyclist aerodynamics: Performance of different turbulence-modeling and boundary-layer modelling approaches. *Journal of Biomechanics*.

Gibertini, G., Grassi, D., 2008. Cycling Aerodynamics. *Sport Aerodynamics*, 23-47.

Grappe, G., Candau, R., Belli, A., Rouillon, J.D., 1997. Aerodynamic drag in field cycling with special reference to the Obree's position. *Ergonomics* 40 (12), 1299–1311, (citado por Defraeye, 2010).

Hart, J., 2005. The Use of CFD in the Chase of Olympic Gold. *Sheffield University, Sheffield, UK*.

<http://www.bhsi.org/howmade.htm>, visto em 20/06/2010.

<http://www.helmets.org/history.htm>, visto em 20/06/2010.

[http://www.memoire-du-cyclisme.net/eta\\_tdf\\_1978\\_2005/tdf1989.php#Lapetite histoire](http://www.memoire-du-cyclisme.net/eta_tdf_1978_2005/tdf1989.php#Lapetite%20histoire), visto em 13/05/2010.

<http://www.smf.org/>, visto em 14/06/2010.

Kyle, C.R., Burke, E.R., 1984. Improving the racing bicycle. *Mechanical Engineering* 106 (9), 34–45, (citado por Defraeye, 2010).

Kyle, C.R., 1990. Wind tunnel tests of bicycle wheels & helmets. *Cycling Science*, 2(1):27-30.

Launder, B. E., Spalding, D. B., 1972. *Lectures in Mathematical Models of Turbulence*. Academic Press, London, England, (citado no ANSYS FLUENT 12.1 User's Guide).

Martin, J.C., 1996. Aerodynamics and cycling. *Master Athlete Physiology and Performance*, (citado por Chabroux, 2009).

McLean, B.D., Danaher, R., Thompson, L., Forges, A., Coco, G., 1994. Aerodynamic characteristics of cycle wheels and racing cyclists. *Journal of Biomechanics*, 27: 675, (citado por Chabroux, 2009).

Menter, F. R.. 1994. Two-Equation Eddy-Viscosity Turbulence Models for Engineering Applications. *AIAA Journal*, 32(8):1598-1605, (citado no ANSYS FLUENT 12.1 User's Guide).



Shih, T.H., Liou, W. W., Shabbir, A., Yang, Z., Zhu, J., 1995. A New  $k$ - $\epsilon$  Eddy-Viscosity Model for High Reynolds Number Turbulent Flows - Model Development and Validation. *Computers Fluids*, 24(3):227-238, (citado no ANSYS FLUENT 12.1 User's Guide).

Sidelko, S., 2007. Benchmark of Aerodynamic Cycling Helmets Using a Refined Wind Tunnel Test Protocol for Helmet Drag Research. Tese de Bacharelato. MIT.

## ANEXO A: CAMPO DE ESCOAMENTO EM TORNO DO CAPACETE 11A

### Capacete na posição 1

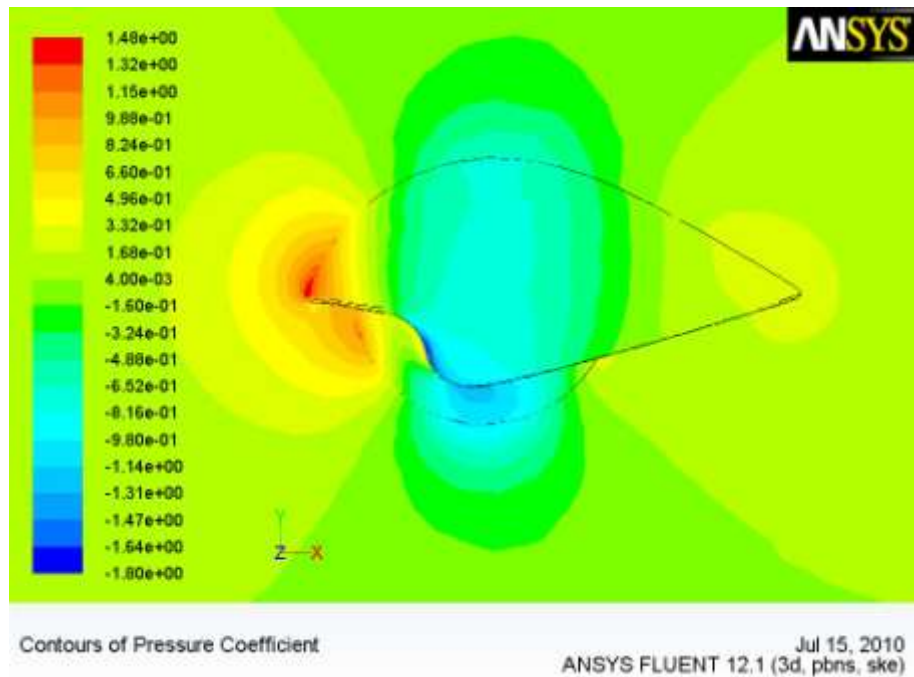


Figura 54: Contornos de coeficiente de pressão.

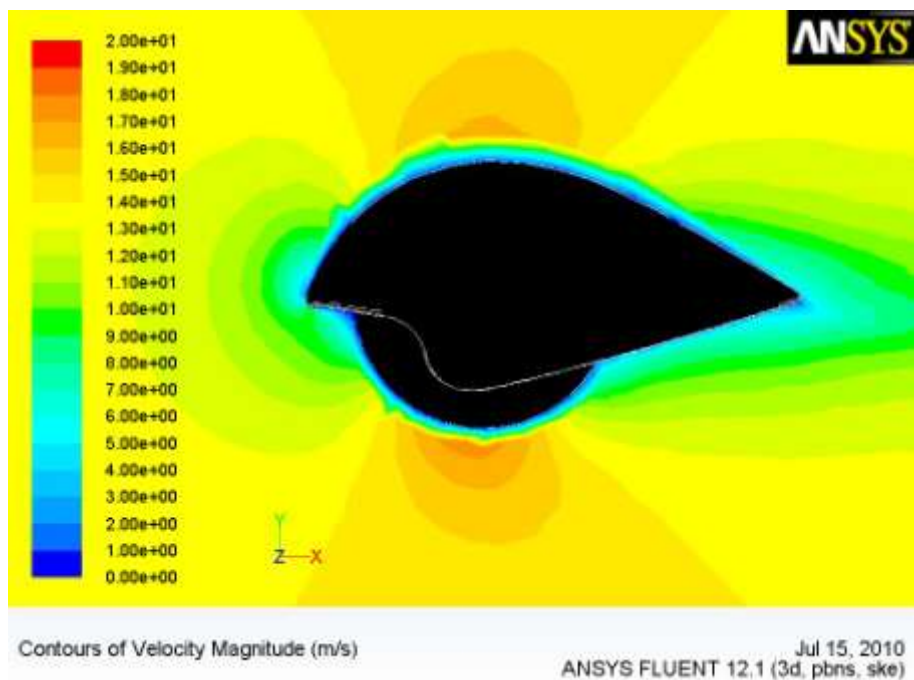


Figura 55: Contornos de velocidade.

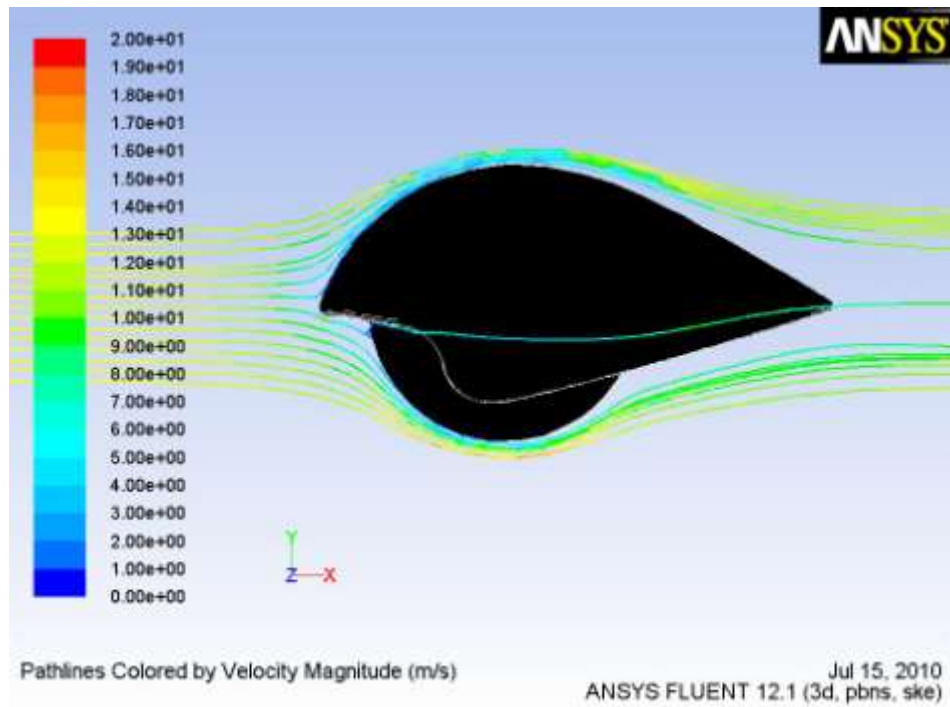


Figura 56: Linhas de corrente do escoamento da velocidade.

## Capacete na posição 2

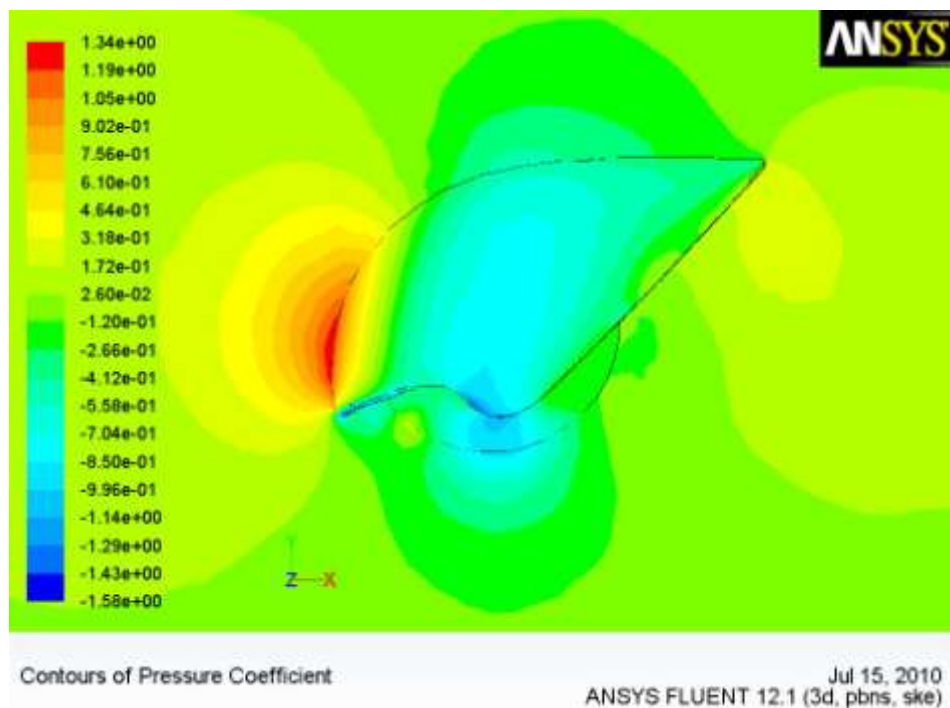


Figura 57: Contornos de coeficiente pressão.

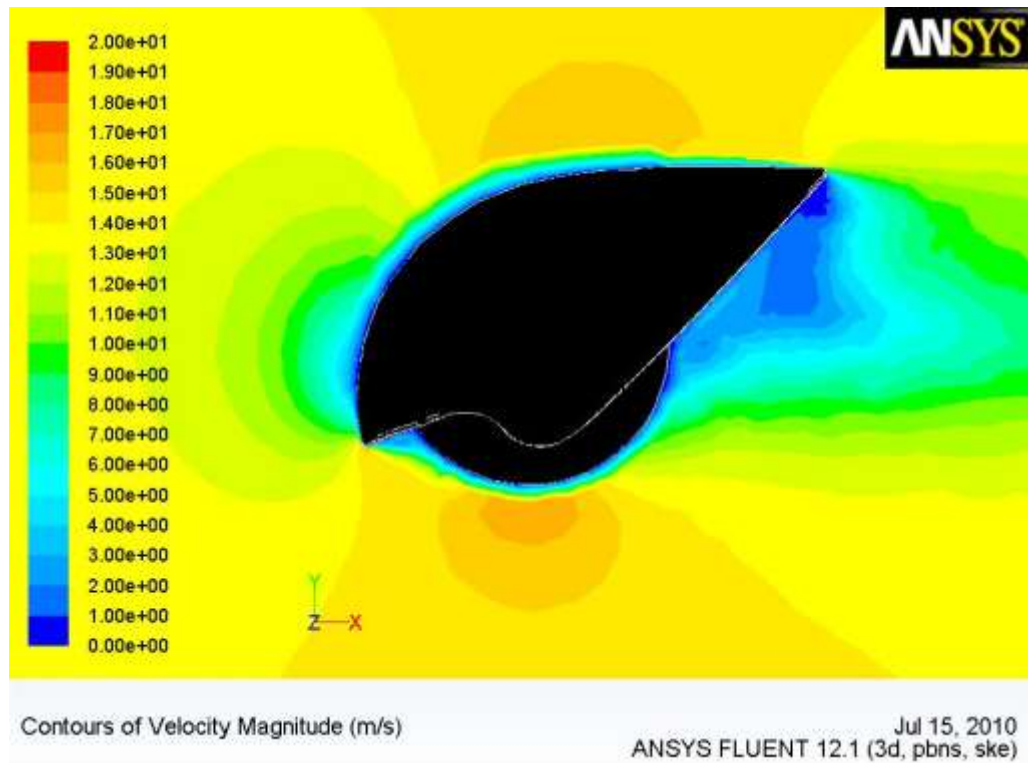


Figura 58: Contornos de velocidade.

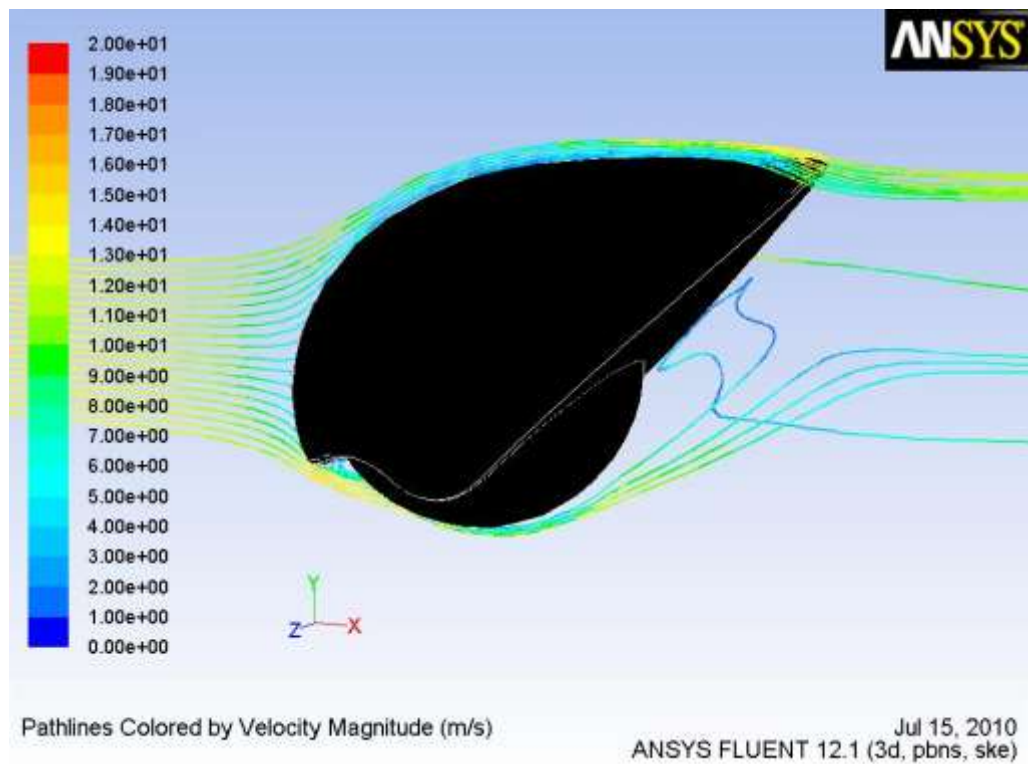


Figura 59: Linhas de escoamento da velocidade (vertical).

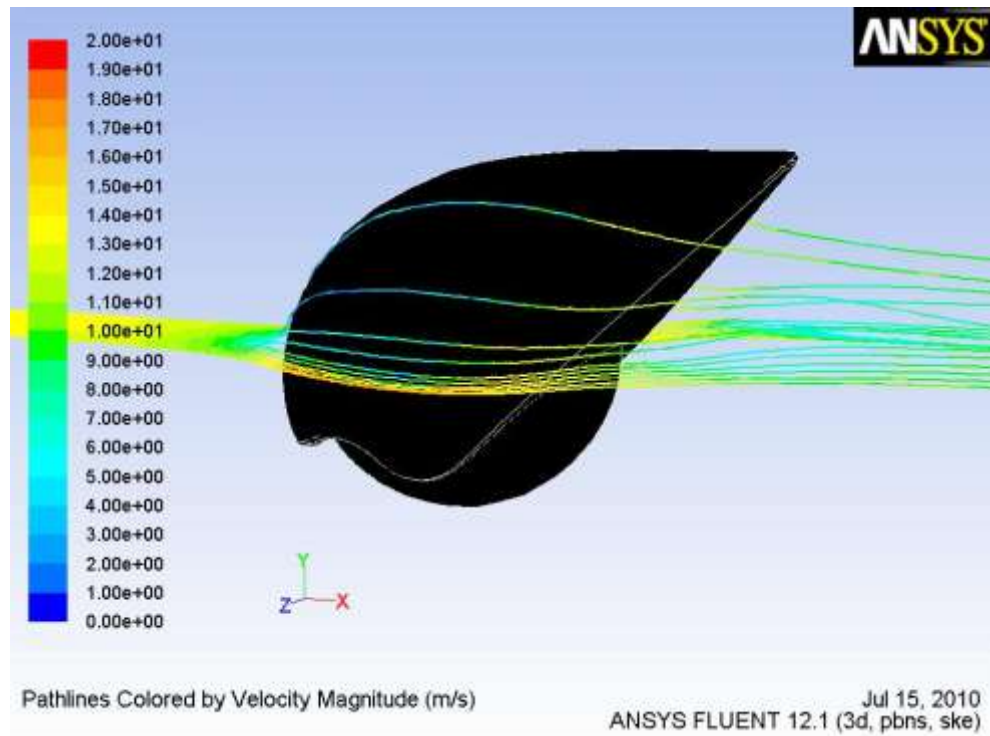


Figura 60: Linhas de corrente do escoamento (horizontal).

### Capacete na posição 3



Figura 61: Contornos de coeficiente pressão.



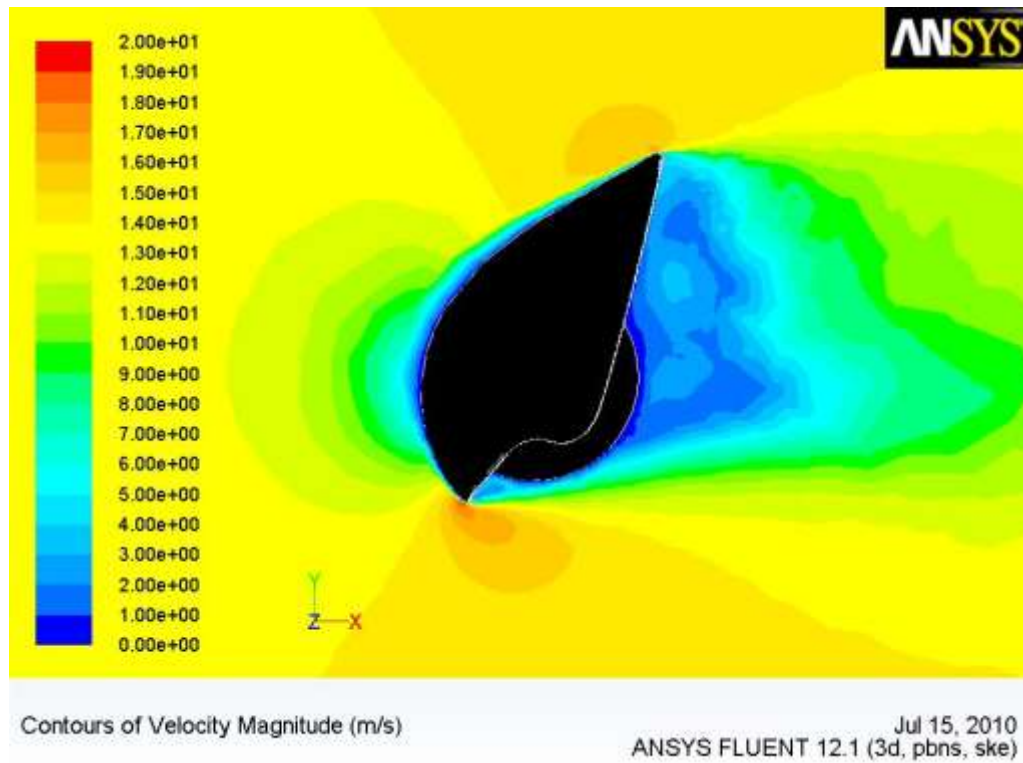


Figura 62: Contornos de velocidade.

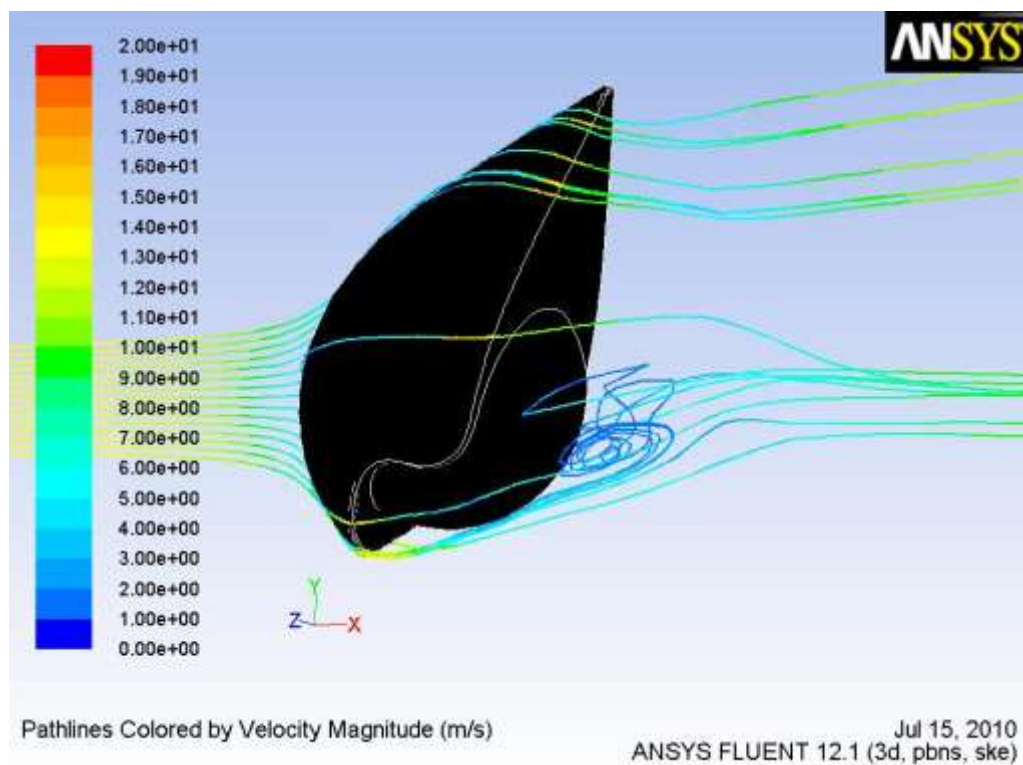


Figura 63: Linhas de corrente do escoamento (colocadas na vertical a montante).

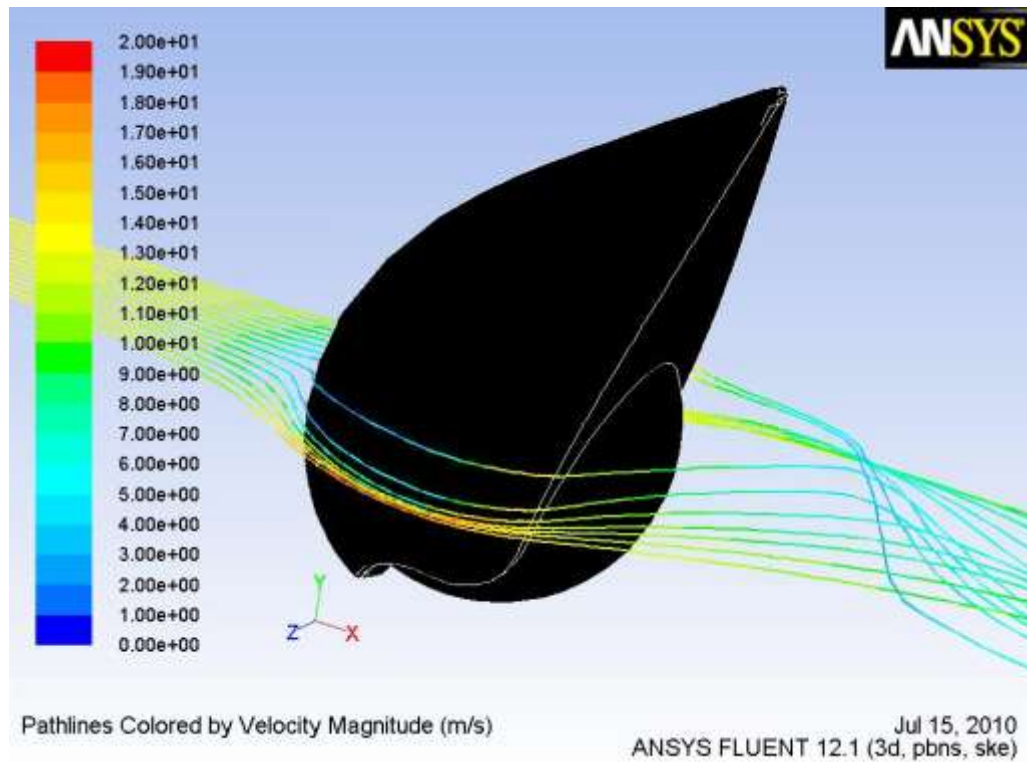


Figura 64: Linhas de corrente do escoamento (colocadas na horizontal a montante).

## ANEXO B: CAMPO DE ESCOAMENTO EM TORNO DO CAPACETE 11B

### Capacete na posição 1

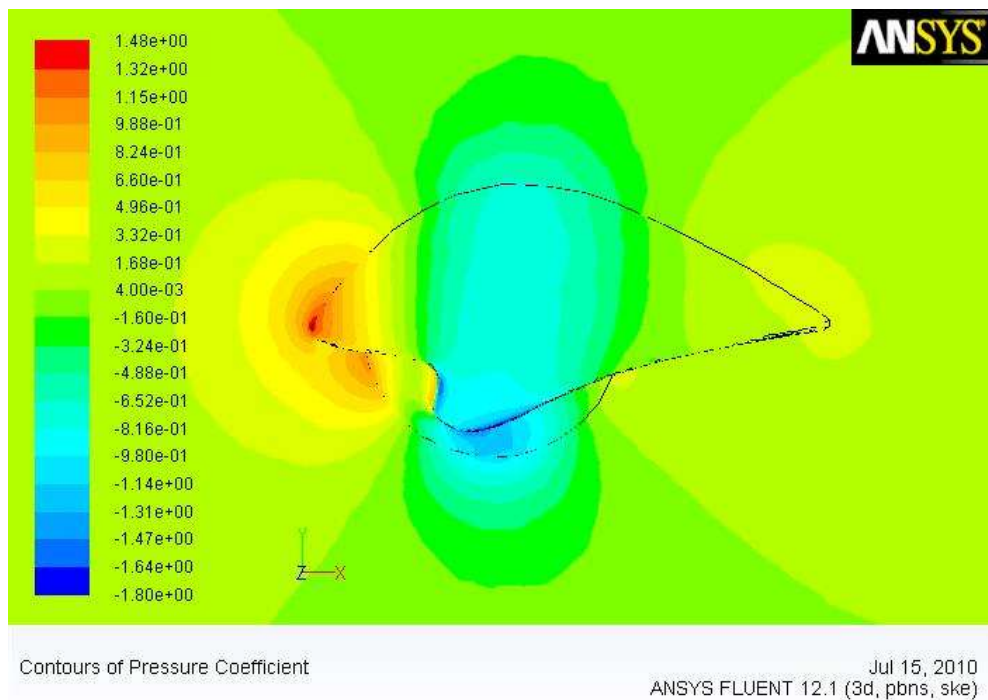


Figura 65: Contornos de coeficiente de pressão.

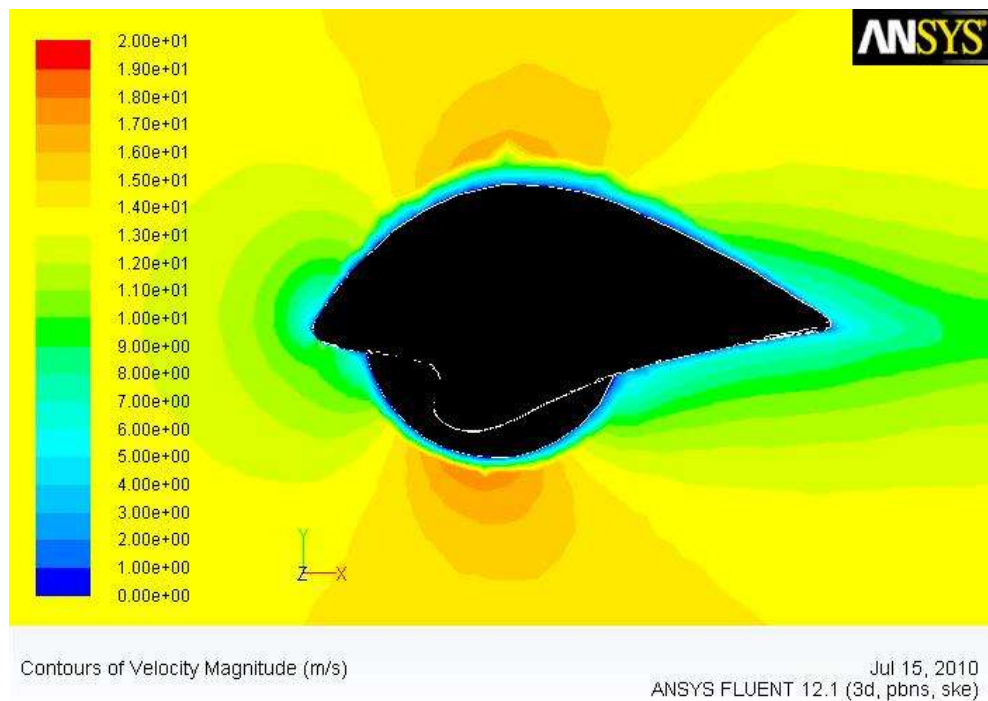


Figura 66: Contornos de velocidade.



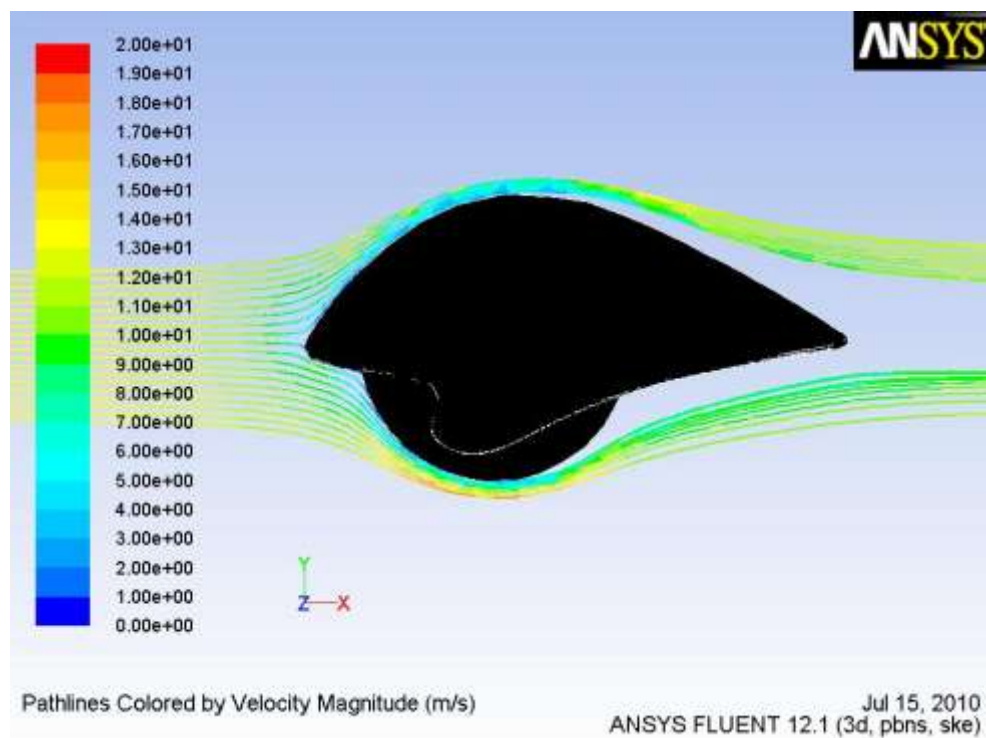


Figura 67: Linhas de corrente do escoamento em torno do capacete.

## Capacete na posição 2

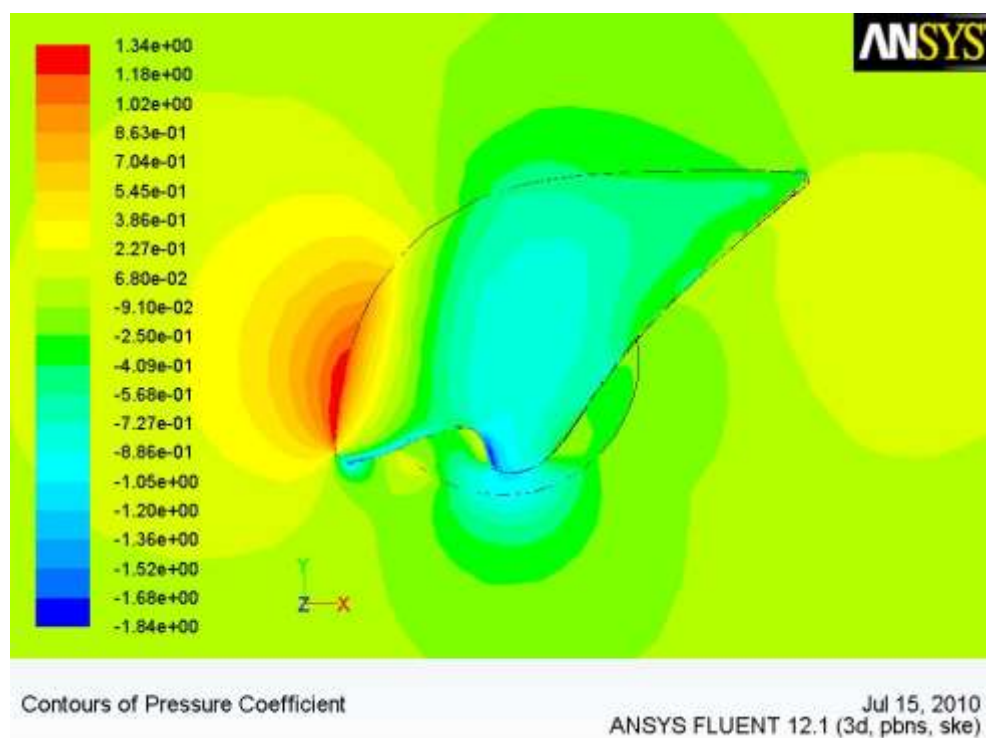


Figura 68: Contornos de coeficiente de pressão.

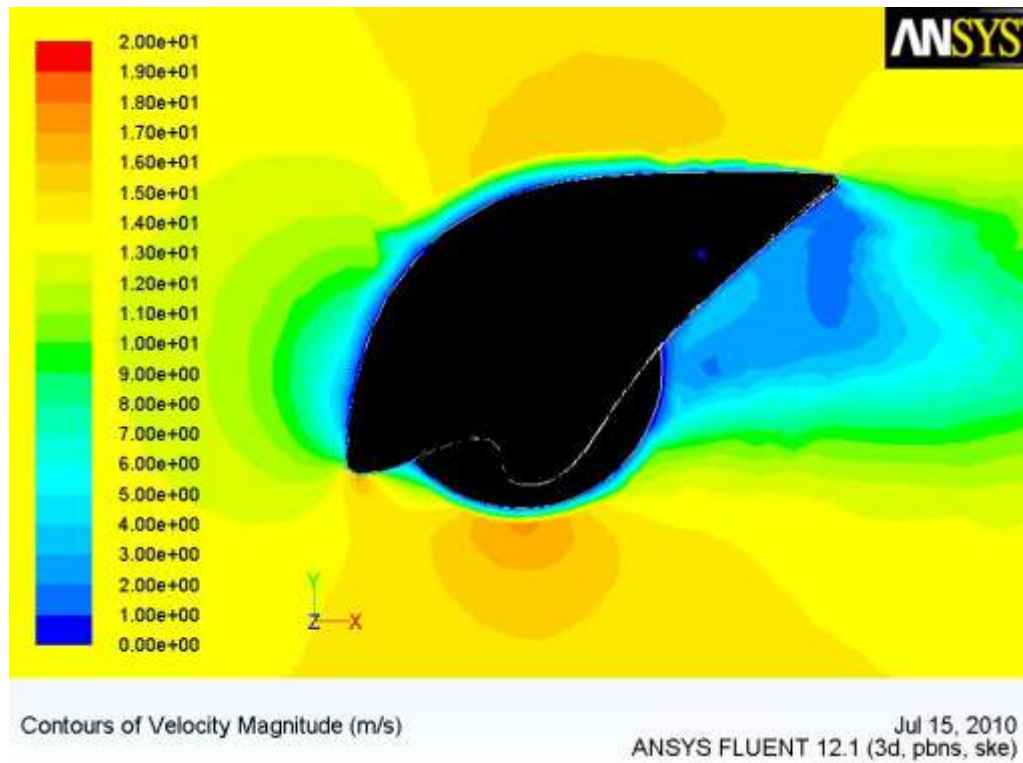


Figura 69: Contornos de velocidade.

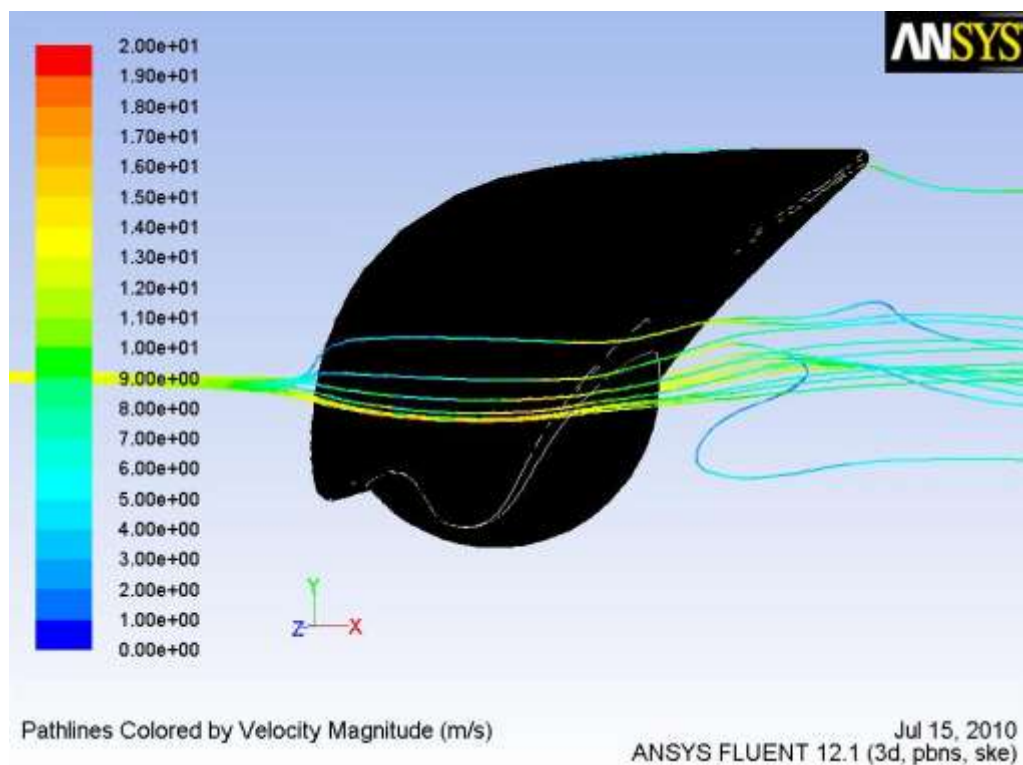


Figura 70: Linhas de corrente do escoamento.

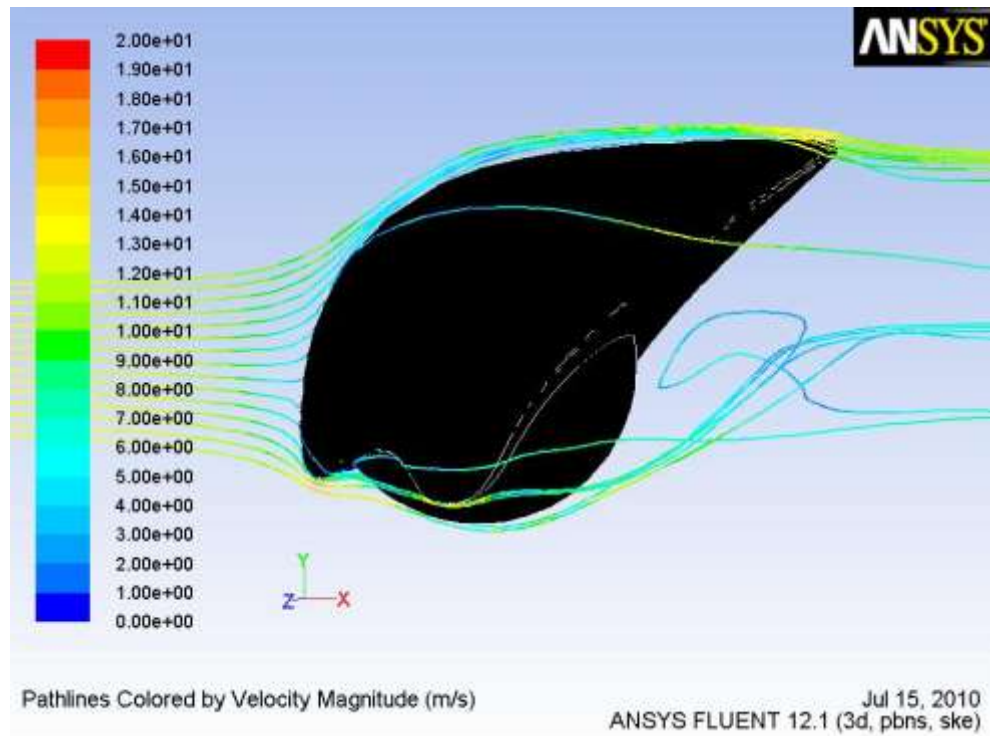


Figura 71: Linhas de corrente do escoamento.

### Capacete na posição 3

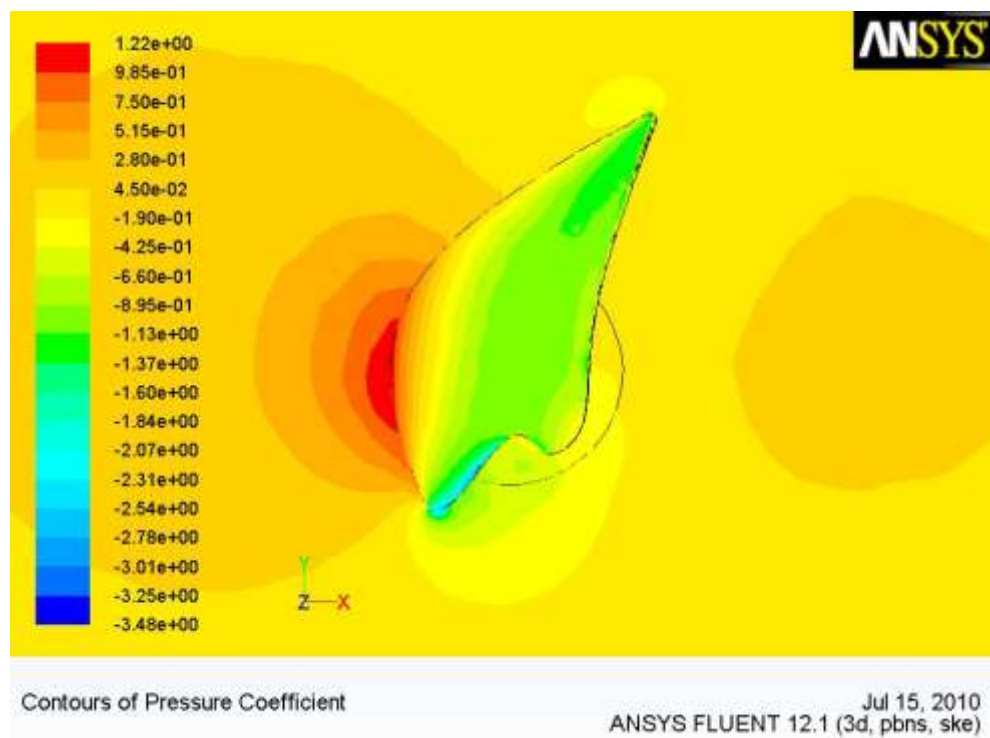


Figura 72: Contornos de coeficiente de pressão.

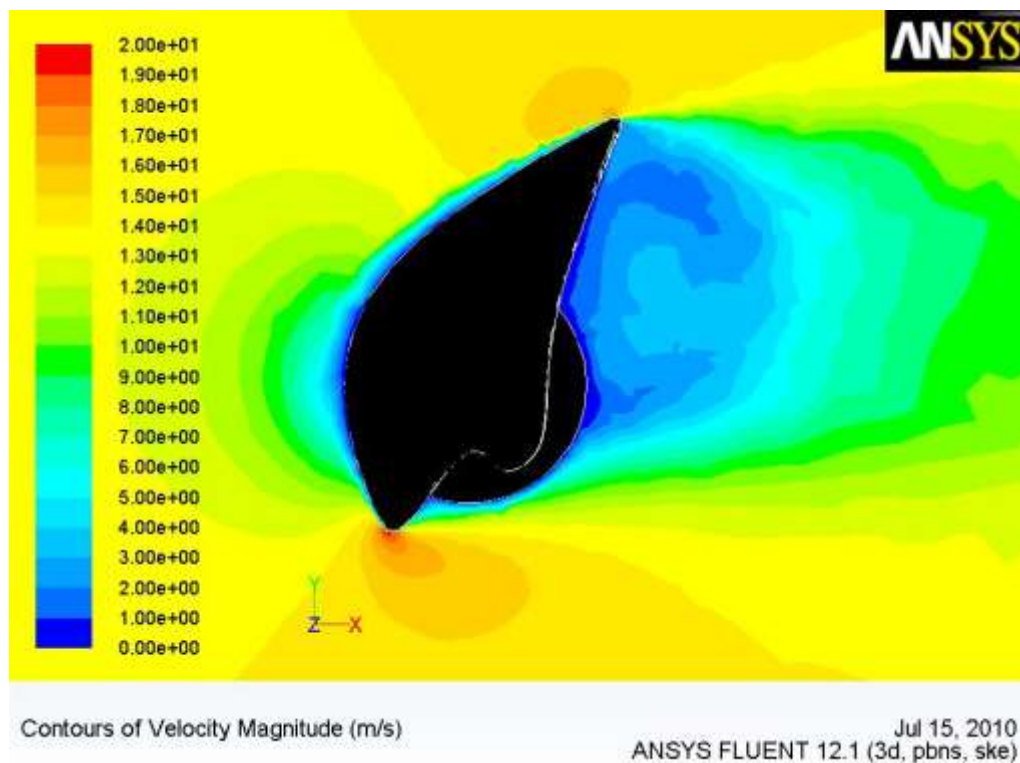


Figura 73: Contornos de velocidade.

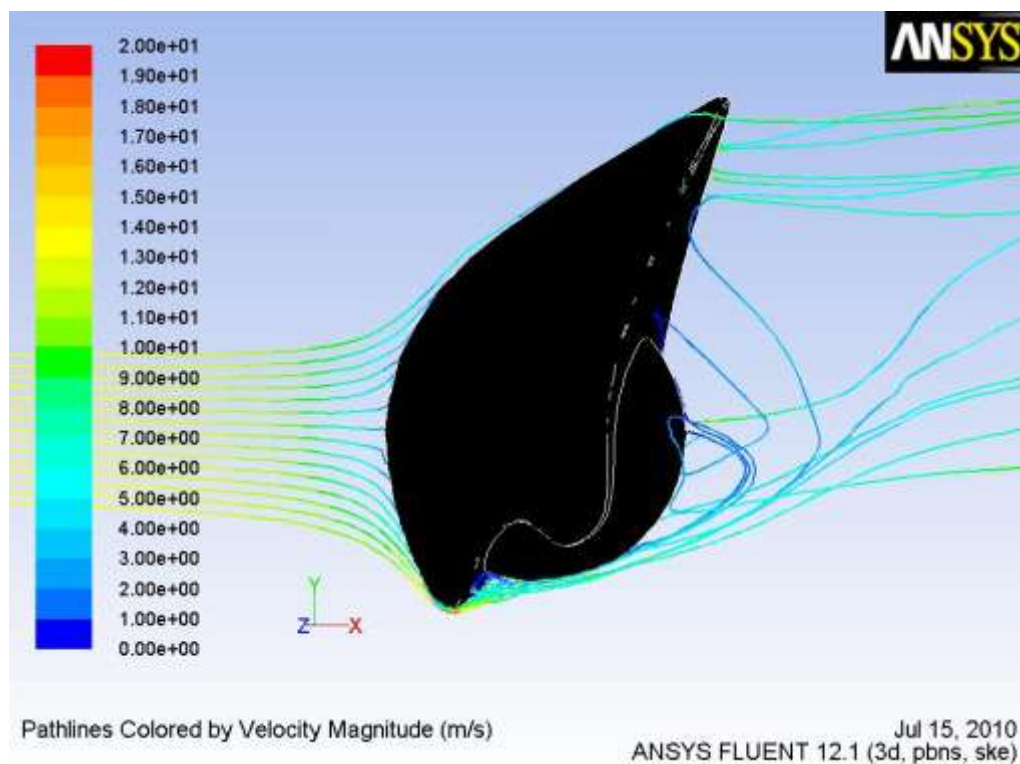


Figura 74: Linhas de corrente do escoamento.



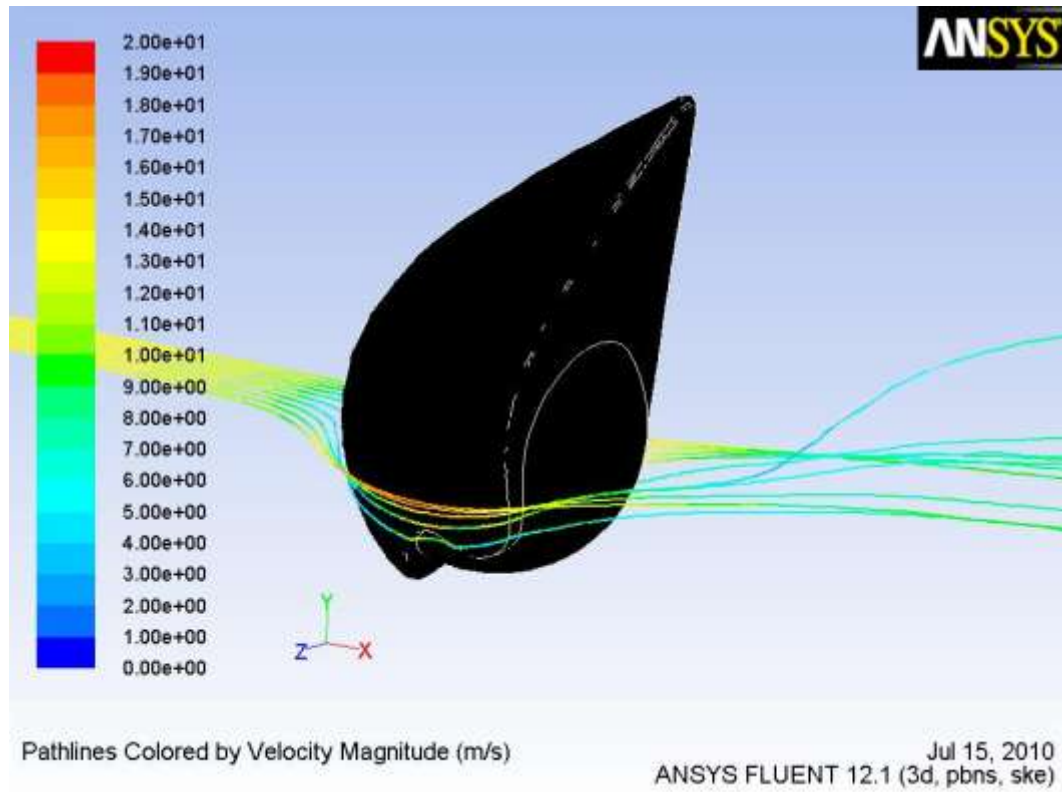
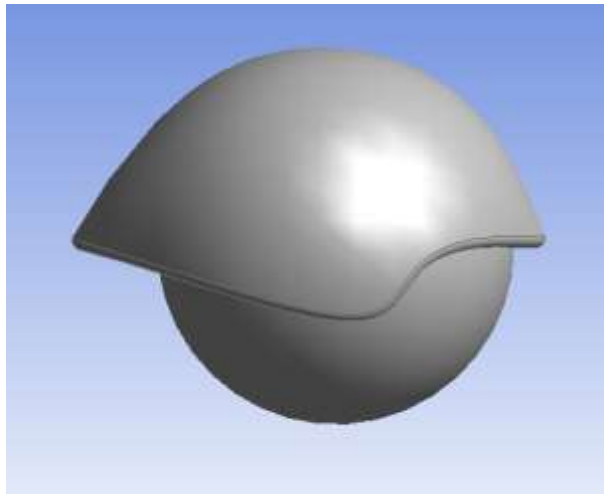
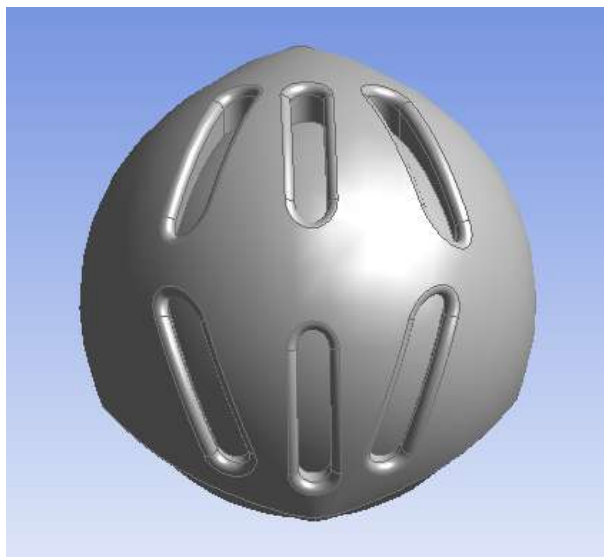


Figura 75: Linhas de corrente do escoamento para a posição 3.

## **ANEXO C: CAPACETE NORMAL**



**Figura 76:** Capacete normal sem aberturas de ventilação.



**Figura 77:** Capacete normal com aberturas de ventilação.

## ANEXO D: CAMPO DE ESCOAMENTO EM TORNO DO CAPACETE NORMAL COM ABERTURAS

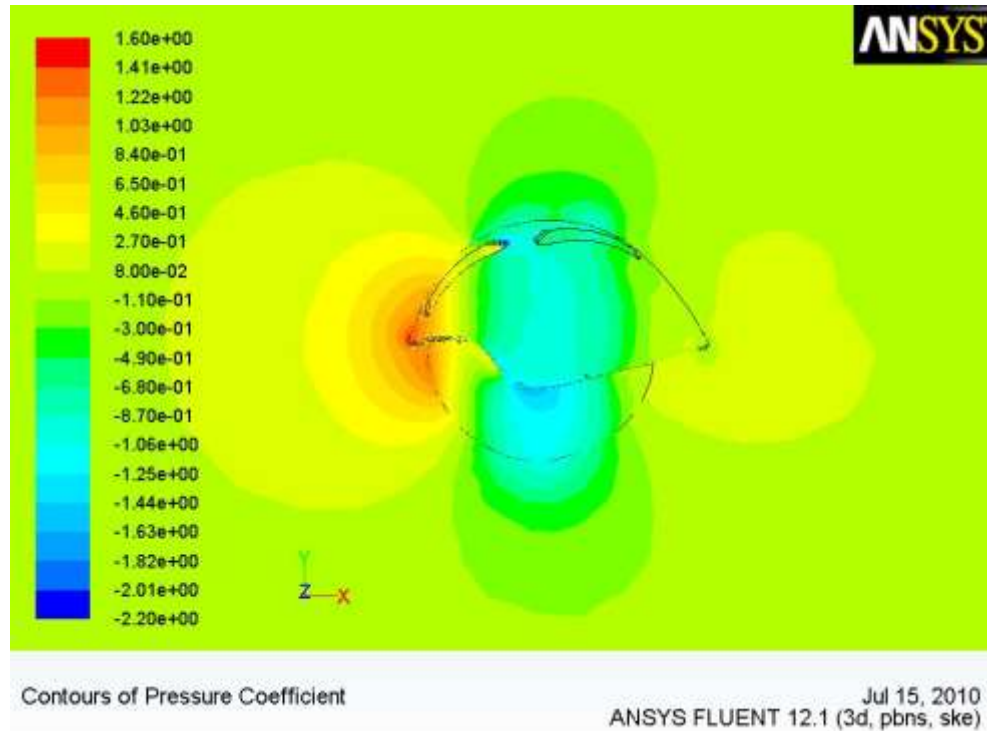


Figura 78: Contornos de pressão no capacete normal com aberturas de ventilação.

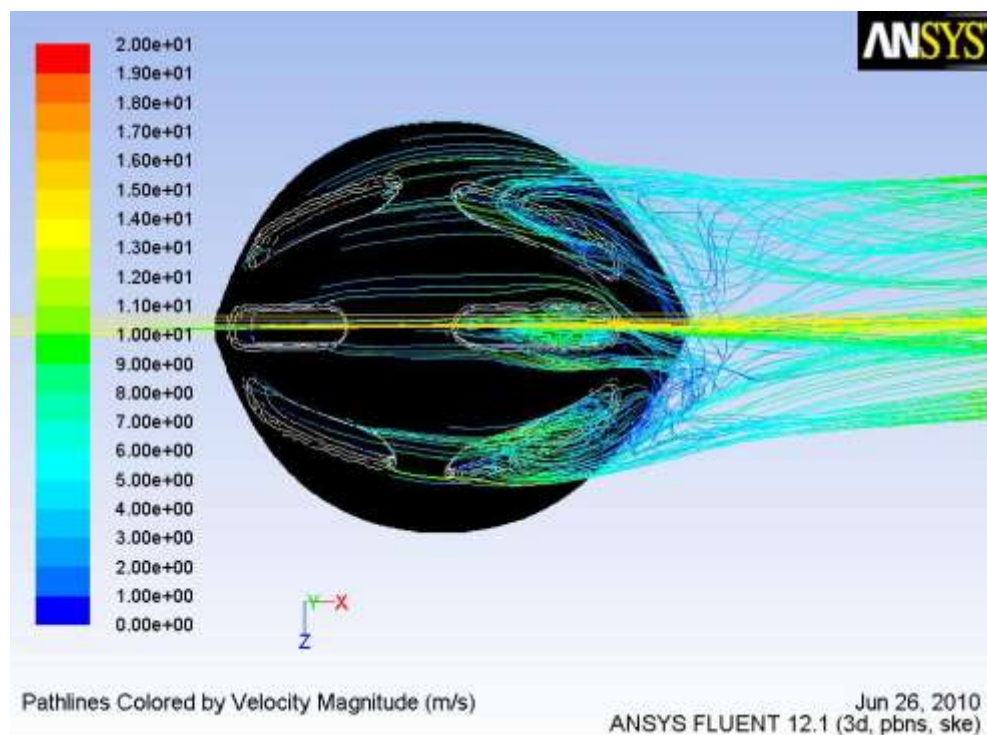


Figura 79: Linhas de escoamento (vista de cima).

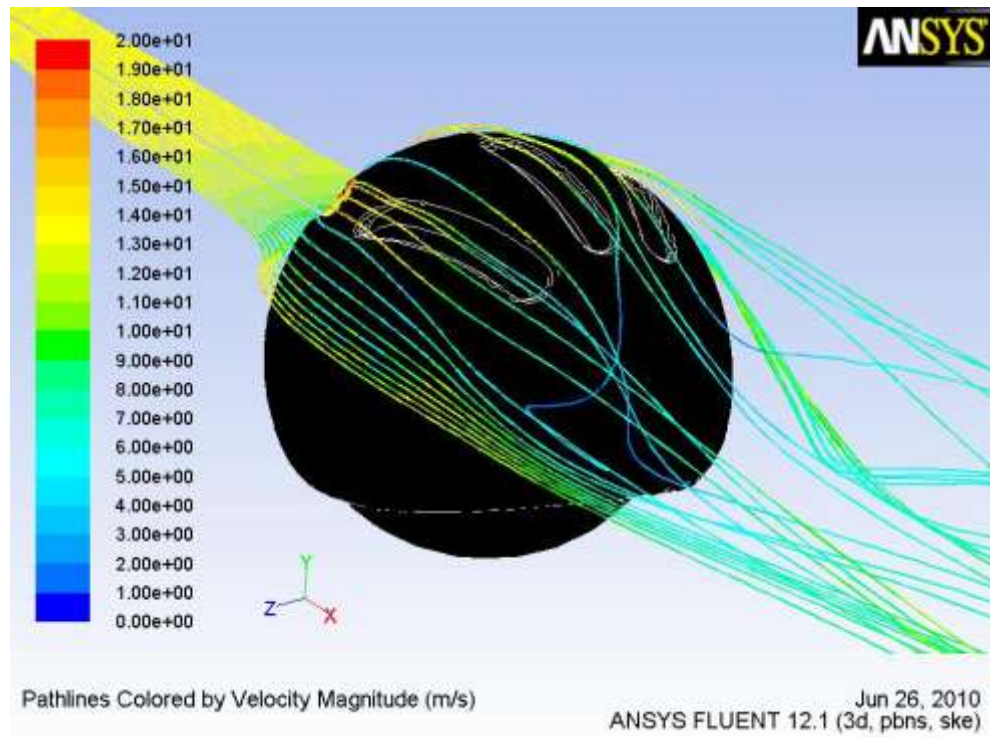


Figura 80: Linhas de corrente do escoamento (vista traseira).